



U
N
E
P
O

República Bolivariana de Venezuela
Universidad Nacional Experimental
"Antonio José de Sucre"
Vicerrectorado Puerto Ordaz
Dirección de Investigación y Postgrado
Unidad Regional de Investigación



MIÉRCOLES
26 Y **27**
JUEVES
• DE JUNIO 2024 •

XXI JORNADAS DE INVESTIGACIÓN 2024

V CONGRESO DE INVESTIGACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

"INGENIERÍA EN LA ERA DE LA IA"

TEMÁTICAS A DESARROLLAR

GERENCIA. EDUCACIÓN. CIENCIAS BÁSICAS. CIENCIAS SOCIALES. INGENIERÍA APLICADA. SERVICIO COMUNITARIO. OPERACIÓN Y PRODUCCIÓN.

UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA

Edición Especial de la Jornadas de Investigación 2024
de la Universidad Nacional Experimental Politécnica
"Antonio José de Sucre", UNEXPO, Vicerrectorado Puerto
Ordaz.

INDIZADA EN:

- Actualidad Iberoamericana 
- Aluminium Industry Abstracts
- Corrosion Abstracts
- CSA Engineering Research Database
- CSA Materials Research Database with METADEX
- CSA Recent References Related to Technology
- CSA Technology Research Database
- Environment Abstracts
- LATINDEX 
- Mechanical & Transportation Engineering Abstracts
- METADEX
- REVENCYT 
- Colección Scielo (www.scielo.org.ve) 
- CiteFactor 
- MIAR 
- ERIHPLUS 

REGISTRADA EN:

- Ulrich's Internacional Periodicals Directory

"Para garantizar la originalidad de los documentos presentados debe llenar el formulario de compromiso de originalidad que se encuentra en este enlace: <https://www.uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/formatos> Todos los artículos presentados deben ser inéditos y originales."

Diagramación y Diseño de Portada:

Br. Manuelis Salazar

Impresión:

Dirección de Investigación y Postgrado, UNEXPO Puerto Ordaz

Visualización de la Revista:

<http://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct>
www.uct.unexpo.edu.ve

DIRECTORIO DE LA REVISTA UNIVERSIDAD, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director: MSc. Miriam Romero

Editor: MSc. Emilio Bravo

Comité Evaluador:

- Dr. Oscar Dam
- Dr. Luis Rosales
- Dr. Sergio Velásquez
- Dr. Luis Lyon
- Dr. Alberto Echegaray
- Dr. Jesús López
- Dr. Eladio Lobo
- Dr. Orlando Gil
- Dr. Ángel Duarte
- Dr. Herman Fernández
- Dra. Sugehis Liscano
- Dra. Mara Girón
- Dra. Katherine Silva
- Dra. Franyelit Suarez
- Dra. Zulay Franco
- Dra. Linda Gil
- MSc. Adrián Olivo
- MSc. Miriam Romero
- MSc. Emilio Bravo
- MSc. Luisa Boet
- MSc. Yosbell Ramírez
- MSc. Mairim Velásquez
- MSc. Krishna Montero
- MSc. Gladys González
- MSc. Thamara Girón
- MSc. Ygnacia Cedeño

Autoridades Nacionales de la UNEXPO

Rectora: Dra. Rita Añez

Vicerrectora Académica: Dra. Fraisa Codecido

Vicerrectora Administrativa: MSc. Mazra Morales

Secretaria: Ing. Magly de Peraza

Autoridades Regionales, Vicerrectorado Puerto Ordaz

Vicerrector: MSc. Richard Resplandor

Director Académico: <Ing. Lucimary Acuña

Director Administrativo: MSc. Yosbell Ramirez

Director de Investigación y Postgrado: MSc. Miriam Romero

Los artículos, opiniones y colaboraciones que se publican en esta revista no representan necesariamente la filosofía informativa ni institucional de la UNEXPO y podrán ser reproducidos previa autorización del Editor. En caso de reproducción se agradece citar la fuente y enviar ejemplares del medio utilizado a la UNEXPO, a la siguiente dirección: Dirección de Investigación y Postgrado, UNEXPO, Vicerrectorado Puerto Ordaz, Alta Vista Sur, Urb. Villa Asia, Final Calle China, Apdo. Postal 8050. Puerto Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela. Telf./fax (0286) 9625245-9611382. Email: uct-poz@unexpo.edu.ve

Contenido

4

López Subero Angimar Del Valle, Efecto de patrones de carga en la obtención de fundición gris empleando la norma astm a - 367 en CVG VENALUM

13

Díaz Frank, Evaluación de la vida útil de una herramienta de corte de acero rápido en el mecanizado de barras de acero (AISI-1060).

22

Barreto Pedro, Lyon Edris, Rojas Francisco, Blanco Erwin y Maita Aymara, Evaluación del Comportamiento Termoeléctrico de las Uniones Apertadas de las Barras Catódicas a los Flexibles Catódicos con Bimetálico Cobre Aluminio en la Celda 129 del Complejo I en CVG Venalum, C.A

29

Andreina Mora, Miriam Romero, Nerismar Angulo, Giorgio Aceto, Evaluación del proceso de soldadura de resistencia por puntos (RSW) en láminas: galvanizadas, de aluminio y galvanizadas con varillas de acero

43

Núñez Ernesto, Ramírez Luis y Rivas Ruth, Predicción de Mezclas de Menas de Hierro y su Comportamiento en un Proceso de Reducción Directa en Lecho Fluidizado

52

Tosta Rafael., Redes Neuronales Artificiales Aplicadas a la Industria del Aluminio

58

Custodio Ángel, Robótica Industrial Colaborativa

EFECTO DE PATRONES DE CARGA EN LA OBTENCIÓN DE FUNDICIÓN GRIS EMPLEANDO LA NORMA ASTM A - 367 EN CVG VENALUM

López Subero, Angimar Del Valle

Angimarlopez15@gmail.com

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”

Resumen: El siguiente trabajo fue realizado en las instalaciones de la Empresa CVG VENALUM, con el objetivo de estudiar el efecto de los patrones de carga en la obtención de fundición gris empleando la Norma ASTM A-367. Para alcanzar este objetivo fue necesario elaborar dos moldes tipo cuña, (molde metal-metal y molde metal-carbón) con el fin de estudiar cómo influye la velocidad de enfriamiento; se evaluaron los patrones de carga de 100% puntas aceradas, 100% guardacabos y mixto (50% puntas y 50% Guardacabo) empleando moldes tipo cuña; se empleó el análisis por microscopía óptica y metalografía de las muestras de fundición gris obtenidas de los patrones de carga. El trabajo cuenta con un diseño experimental, basándose en la observación del comportamiento de la fundición gris analizando evaluaciones metalúrgicas. La población estuvo representada por 3 muestras de fundición gris, en la que cada una corresponde a un patrón de carga. El estudio metalográfico reveló la presencia de una microestructura formada por dendritas de austenita transformada en perlita, con láminas de grafito tipo A, E y D.

Palabras Clave: Análisis, Fundición gris, patrón de carga.

EFFECT OF LOADING PATTERNS ON OBTAINING GREY IRON USING ASTM A - 367 STANDARD IN CVG VENALUM

Abstract: The following study was conducted at CVG VENALUM. The objective was to study the effect of loading patterns on the production of gray cast iron using ASTM A-367. To achieve this objective, it was necessary to create two wedge-shaped molds (a metal-to-metal mold and a metal-to-carbon mold) to study the influence of cooling rates. Loading patterns for 100% steel tips, 100% thimbles, and mixed (50% tips and 50% thimbles) were evaluated using wedge-shaped molds. Optical microscopy and metallographic analysis of the gray cast iron samples obtained from the loading patterns were used. The study has an experimental design based on the observation of gray cast iron behavior by analyzing metallurgical evaluations. The sample population was represented by three gray cast iron samples, each corresponding to a loading pattern. The metallographic study revealed the presence of a microstructure formed by dendrites of austenite transformed into pearlite, with sheets of type A, E and D graphite.

Keywords: Analysis, Gray cast iron, loading pattern.



I.INTRODUCCION

El presente trabajo detalla el estudio del efecto de patrones de cargas en la obtención de fundición gris empleando la norma ASTM A-367, a través de la evaluación de análisis químico, metalográfico y dureza de las muestras tomadas a las coladas líquidas en los hornos de inducción con moldes tipo cuña que posteriormente son enviadas al Laboratorio Central de CVG Venalum. La

fundición gris que se utiliza para el empalme de los ánodos, varilla anódica, se realiza con materia prima principalmente hierro y ferroaleaciones, lo que garantiza que se tenga una composición química adecuada, actualmente la empresa está presentando problemas por falta de adquisición de materiales y recursos, por esta razón se implementan estrategias alternativas con diversos patrones de carga 100% puntas aceradas, 100% guardacabos y mixto 50% puntas y 50% guardacabo,

siempre y cuando la fundición que se realiza en los Hornos de Inducción sea favorable para tu utilidad.

La fundición gris fabricada en las instalaciones de este departamento es una fundición gris laminar de matriz perlítica.

II.DESARROLLO

Elaborar dos moldes tipo cuña, molde (metal-metal) y molde (metal-carbón) empleando la norma ASTM A-367 para estudiar la velocidad de enfriamiento.

Para la elaboración de moldes tipo cuña se empleó, la norma ASTM A-367, que las dimensiones a cumplir por la cuña sean las indicadas, en este caso como la W4 en la figura 1 de dimensiones de la norma, ya que es la que más se acerca a lo requerido en la empresa, ver Figura 14.

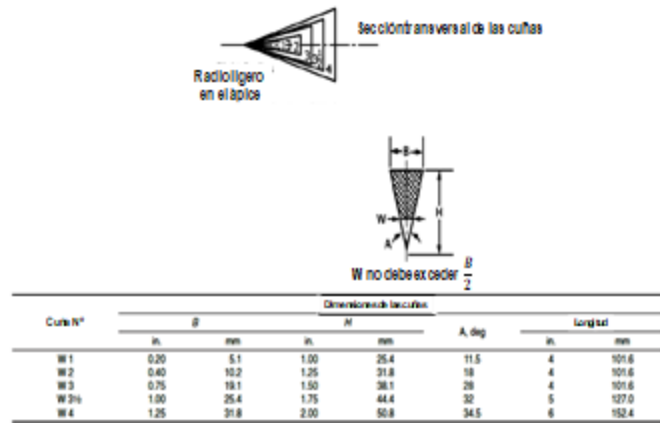


Figura 1. Dimensiones para la cuña Fuente: Figura 1 de Norma ASTM A367-22, pág. 2. Evaluar patrones de carga de 100% puntas aceradas, 100% guardacabos y Mixto (50%

Puntas aceradas y 50% Guardacabo) empleando los moldes tipo cuña de la norma ASTM A-367.

trones de carga. Cada uno presenta diferencia en cuanto a la cantidad de materia prima que se utiliza para cada carga del Horno de Inducción.

Para llevar a cabo este objetivo se usaron los valores mostrados en la Tabla 1, donde se muestran los pa-

Tabla 1: Patrones de Carga utilizados.

PATRÓN DE CARGA	MASA DE CARBURIZANTE (kg)	MASA DE FeSi (kg)	MASA DE FeP (kg)	MASA DE SiMg (kg)	MASA DE PUNTAS (kg)	MASA DE GUARCADABO (kg)
Guardacabo	17	15	8	10	0	1450
Puntas Aceradas	52	41	10	9	1200	0
Mixto	20	8	12	4	120	1290

Fuente: Control de Calidad CVG Venalum.

Muestras Metalograficas de fundición gris de patrones de carga diversos realizando análisis de microscopia óptica y metalografía.

La preparación para los análisis de las piezas por Microscopia Óptica y Metalografía se realizó siguiéndolas siguientes etapas:

Corte de la pieza a 3 cm.

Desbaste

Disco 1: Para ir eliminando las rayas usando un tiempo de 10min.

Disco 2: se empleó lubricante y abrasivo de 6 µm

Pulido grueso: Una vez acabada la pieza se pulió en un paño grueso con alúmina 1 µm, para quitar los planos provocados por los discos

Pulido fino: Se pulió la pieza en un paño fino con alúmina de 0.3 µm.

Pulido ultra fino: Por último, se pulió la pieza con paño fino y alúmina de 0.005 µm..

Una vez obtenidas las piezas a espejo se procedió a la caracterización sin ataque, de la matriz.

Una vez realizado lo anterior, se procedió a un ataque químico severo de oscurecimiento de la pieza, para

la cuantificación de carburos. Para este ataque se aplicó una solución de: agua destilada más alcohol etílico, después del secado se atacó con Nital + Picral al 5%. Este procedimiento fue realizado en las 3 piezas.

III.RESULTADOS

Elaborar dos moldes tipo cuña, molde (metal-metal) y molde (metal-carbón) empleando la norma ASTM A-367 para estudiar la velocidad de enfriamiento.

Según la Norma ASTM A-367, el molde tipo cuña brinda las medidas de fabricación de una muestra triangular, el cual es utilizado para medir la velocidad de enfriamiento para la fundición de hierro. Este proporciona métodos de prueba para evaluación en frío del hierro gris, utilizando dos pruebas individuales, dependiendo de la resistencia de los materiales de hierro.

Para la realización de estos ensayos se fabricaron moldes de acero 1020 para el diseño de la cuña y un proceso de corte y soldadura; esta cuña posee dimensiones específicas según lo establece la Norma ASTM A - 367.

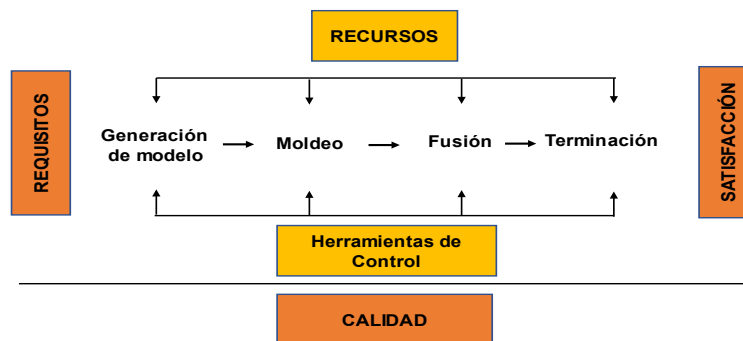
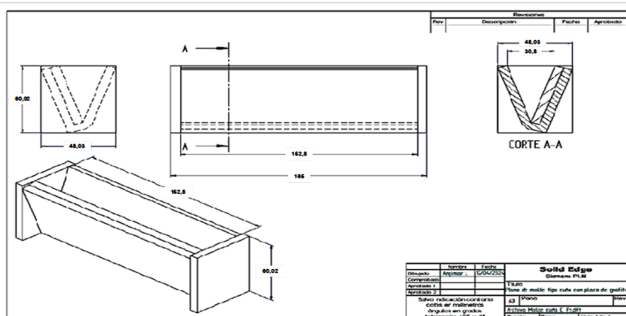


Figura 2. Diagrama de procesos de la Fundición.

Fuente: La Autora (2024)

Plano de Fabricación Molde Metal-Metal

Para la elaboración de los moldes tipo cuña Metal-Metal, según la norma ASTM A-367, se utilizaron planchas de acero SAE 1020 de 3 mm de espesor para el molde con caras metálicas.



Plano de Fabricación Molde Metal-Carbón

Para la Elaboración del molde tipo cuña Me-

tal-Carbón según norma ASTM A-367 se emplearon planchas de acero SAE 1020 de 3mm de espesor y un trozo de Carbón Cocido, que fue mecanizado y llevado a las medidas correspondientes, seguido de un proceso de corte y soldadura.

Acero 1020: Es un acero de bajo contenido de carbono, de fácil mecanizado y buena soldabilidad

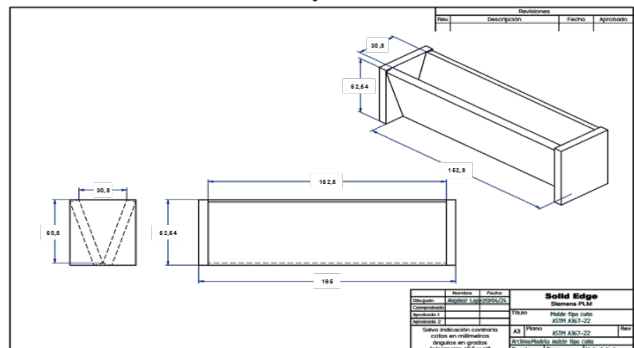




Figura 3. Molde Metal-Metal y Metal-Carbón
Fuente: La Autora (2024)

Evaluar Patrones de carga 100% puntas aceradas, 100% Guardacabo y mixto (50% puntas aceradas y 50% guardacabo) empleando los moldes tipo cuña de la norma A-367.

Para el desarrollo de este objetivo se tomaron muestras a cada patrón de carga (Puntas Aceradas, Guardacabo, Mixto) con sus análisis correspondientes de tal manera que el estudio presente las diferencias de cada Patrón de carga en el Análisis Químico y Ensayo de dureza.

Patrón de carga 100% puntas aceradas

Tabla.1 Patrón de carga 100% Puntas aceradas.

Materia prima	Carga remanente	FeSi	FeMn	FeP	Carburizante	Puntas de Yugo	Potencia del Horno	Tiempo de Fusión	Temperatura de Vaciado.
Cantidad (kg)	1550	41	7	No disponible	71.4	874	300 kW	2:30 h	1480-1490 °C

Muestra 1 utilizando molde tipo cuña pared Metal-Metal

En la preparación de la colada N° 1, se utilizó un patrón de carga 100% puntas, siguiendo una secuencia cuidadosa con el personal de turno, trabajadores espe-

cializados en la carga y fusión de materiales en los Hornos de Inducción; para este se utilizó el Horno 3, ubicado en la Sala de Envarillado de Ánodos de la empresa CVG Venalum.

Tabla N° 2 Análisis Químico según Norma ASTM E-485

Análisis Químico (%)							
Elementos							
Muestra	Fe	C	Si	P	Mn	S	Ce
Horno 3 Colada 1	92,44	3,60	2,77	0,65	0,49	0,41	4,38

Ensayo de Dureza

Variación de la dureza en función de la profundidad

del espesor, para la Probeta 1, muestra 1.

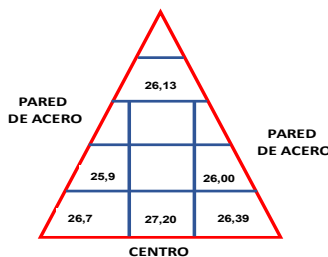


Tabla N°3. Dureza Rockwell C (HRC) Según Norma ASTM E-18

Muestra	Número de Indentaciones						Desv. Estándar
	1	2	3	4	5	Promedio	
Horno 3 Muestra 1	26,13	27,20	26,00	25,9	26,7	26,39	0,55

Las muestras fueron ensayadas bajo las siguientes condiciones ambientales: Temperatura: 26,48 °C; Humedad: 62,58%.

La norma de CVG Venalum lo datos operativos están comprendido en un rango aproximado de 4.10-4.70% de CE, según la evaluación que se obtuvo en la tabla N° 4 para la muestra N° 1, los datos obtenidos

corresponde a una fundición gris con un porcentaje de 4.42%CE de tal manera la colada preparada está dentro de los parámetros que maneja la empresa, por lo tanto muestra una evidencia clara que al observar los valores de dureza de la probeta N°4 con un promedio de 26.39 HRCes típica de la fundición gris.

Tabla 4. Patrón de Carga 100% Guardacabo

Materia prima	Carga remanente	Fe Si	Fe Mn	FeP	Carburizante	Guardacabo	Potencia del Horno	Tiempo de Fusión	Temperatura de Vaciado.
Cantidad (kg)	1550	8	4	No disponible	15	750	300 kW	2:30 h	1480-1490 °C

Muestra 2 utilizando molde tipo cuña pared Metal-Metal

Para la preparación de la colada N° 2, se utilizó un patrón de carga 100% Guardacabo, el cual consiste

en chatarra de fundición gris más materia prima, seguidamente de una carga cuidadosa en el Horno de Inducción, con el personal de turno especializado.

Tabla N° 5. Análisis Químico según Norma ASTM E-485

Análisis Químico (%)							
Elementos							
Muestra	Fe	C	Si	P	Mn	S	Ce
Horno 3 Colada 1	92,76	3,53	2,57	0,71	0,32	0,36	4,42

Ensayo de Dureza

Variación de la dureza en función de la profundidad

del espesor para la Probeta 1, muestra 2.

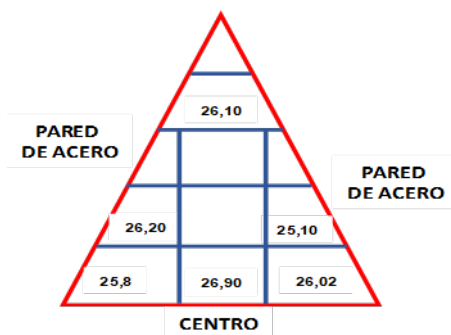


Tabla N° 6. Dureza Rockwell C (HRC) Según Norma ASTM E-18

Muestra	Número de Indentaciones						Desv. Estándar
	1	2	3	4	5	Promedio	
Horno 3 Muestra 1	26,10	26,20	26,90	25,10	25,8	26,02	0,65

Las muestras fueron ensayadas bajo las siguientes condiciones ambientales: Temperatura: 26,48 °C; Humedad: 62,58%.

La norma de CVG Venalum lo datos operativos están comprendido en un rango aproximado de 4.10-4.70 de CE, según la evaluación que se obtuvo en la tabla N° 6 para la muestra N°2, los datos obtenidos

corresponde a una fundición gris con un porcentaje de 4.42%CE de tal manera la colada preparada está dentro de los parámetros. De acuerdo con el ensayo de dureza promedio de 26.02HRC, dicho resultado nos confiere que la fundición gris cumple con las propiedades mecánicas necesarias para su uso en los ánodos, según la normativa de la empresa.

Tabla 7. Patrón de Carga Mixto (50% Guardacabo, 50% Puntas aceradas)

Materia prima	Carga remanente	Fe Si	FeMn	FeP	Carburizante	Guardacabo	Puntas Aceradas	Potencia del Horno	Tiempo de Fusión	Temp. de Vaciado
Cantidad (kg)	1550	8	4	No disp.	20	360	360	350 kW	2:30 h	1480-1490

Muestra 3 Utilizando molde cuña pared Metal-Carbón

Para la colada 3 se utilizó un patrón de carga mixto que corresponde a una carga de 50% Puntas Aceradas y 50% Guardacabo, este se utiliza como alternativa de solución, con la finalidad de que el proceso productivo

en la sala de Envarillado sea continuo. Dicho patrón de carga lleva un seguimiento estricto por parte de Control de Calidad y Procesos; los estudios previos han revelado que la “receta” cumple con la función y el empalme en los ánodos cocidos; ya que, la viabilidad del proceso es que cumpla con las propiedades físico químicas.

Tabla 8. Análisis Químico según Norma ASTM E-485

Análisis Químico (%)							
Elementos							
Muestra	Fe	C	Si	P	Mn	S	Ce
Fundición Gris	90.44	3.30	3.76	0.80	0.90	0.50	4.58

Ensayo de Dureza

Variación de la dureza en función de la profundidad

del espesor en la Probeta 2, muestra 3.

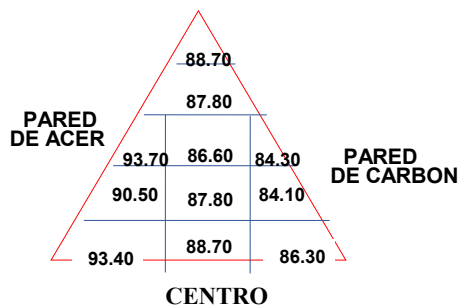


Tabla 9. Dureza Rockwell B (HRB) Según Norma ASTM E-18

Muestra	Número de Indentaciones						Desv. Estándar
	1	2	3	4	5	Promedio	
Zona pared Metal	93.70	93.20	90.50	93.40	90.00	92.24	1,64
Zona pared Carbón	84.30	84.10	81.40	85.40	86.30	84.30	1,85
Zona Centro	88.70	87.80	86.60	87.80	88.70	87.92	0.86

Los valores de dureza son mayores en comparación a los de la pared de acero con un promedio de 92.24 HRB que en la pared de carbón promedio de 84.30 HRB y el centro de la probeta promedio de 87.92 HRB. Esto de que haya mayor cantidad de perlita hacia el lado de acero y mayor ferrita hacia el lado carbón, teniendo la misma fundición, se puede explicar de la siguiente manera: siguiendo el diagrama de hierro carbono metaestable, cuando la velocidad de enfriamiento es moderada en la zona de los 723°C, una parte del carbono difunde en la ferrita y la otra parte no le da tiempo de difundirse quedando dentro de la perlita.

Muestras Metalograficas de fundición gris de patrones de carga diverso.

Patrón de Carga 100% Puntas Aceradas

Para este estudio se utilizó un patrón de carga 100% Puntas aceradas y un molde tipo cuña, según norma ASTM A367, con ambas paredes Metal-Metal.

Centro de la muestra

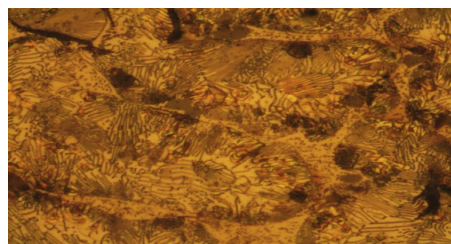


Figura 4a. Metalografía 500X

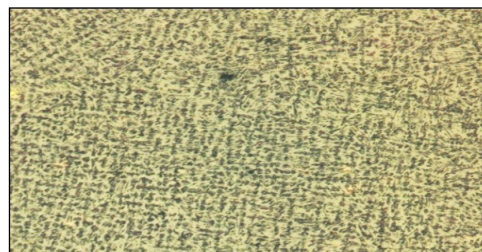


Figura 4b. Metalografía 100X

Zona superior de la muestra

En la Figura 4a, la muestra presenta una microestructura formada por dendritas de austenita transforma-

da en perlita, con láminas de grafito tipo E.

En la Figura 4b, se observa una estructura característica de una fundición gris, constituida por dendritas bien definidas, esto se debe a la presencia de láminas de carburos de grafito tipo E.

Patrón de Carga 100% Guardacabo

Para este estudio se utilizó un patrón de carga 100% Guardacabo y un molde tipo cuña, según la norma ASTM A367, con ambas paredes Metal-Metal

Zona de contacto con el Acero

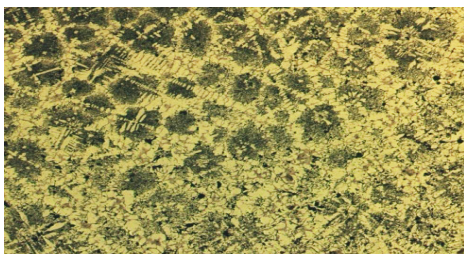


Figura 5a. Metalografía 200X

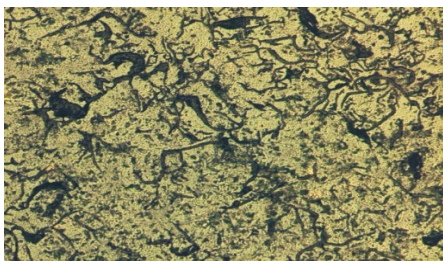


Figura 5b. Metalografía 300X

Zona inferior de la muestra

En la Figura 5a, se observa que la muestra presenta dendritas primarias bien definidas, dicha fundición está constituida por dendritas primarias de Austenita transformada en Perlita, láminas de grafito tipo C.

En la Figura 5b, se muestra, con un aumento de 500X, la presencia de láminas de Carburo de Hierro, Cementita Fe₃C, C y láminas de grafito tipo E.

Patrón de Carga Mixto

Para este estudio se realizó un patrón de carga 50% Guardacabo 50% puntas Aceradas, más un molde tipo cuña pared Metal-Carbón.

Centro de la muestra

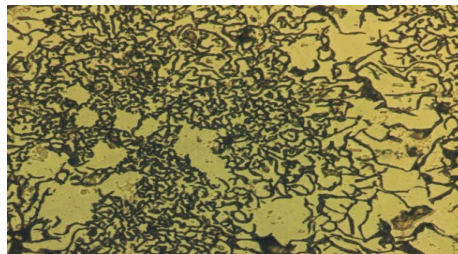


Figura 6a. Metalografía Aumento 100X

Pared metálica Figura

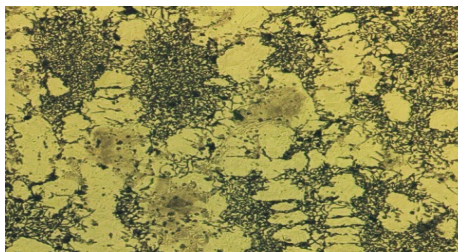


Figura 6b. Metalografía Aumento 100X

Pared Carbón

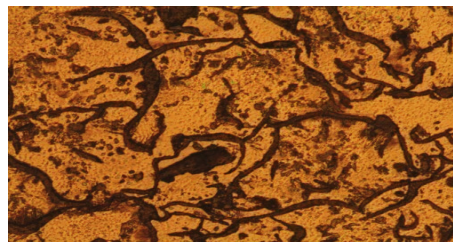


Figura 6c. Melografía Aumento 500X

La Figura 6a, presenta la fotomicrografía del centro de la muestra, en ella se observa una estructura característica de una fundición gris constituida por hojuelas de grafito tipo D y patrón dendrítico primario bien definido, con orientación aleatoria (gris claro), típica de la estructura favorecida por el enfriamiento más lento del metal que está en contacto con la pared de carbón, y la otra estructura por laminas de grafito tipo D, producto del enfriamiento más rápido que se obtiene en la pared metálica del molde, ambas comparten la misma matriz perlítica. El Aumento fue de 100x.

Para la Figura 6b, Pared Metálica, en la fotomicrografía se observa una estructura característica de una fundición gris constituida esencialmente por hojuelas de grafito tipo D, las cuales forman un patrón dendrítico bien definido, con orientación aleatorio (gris claro) en una matriz perlítica. Esta estructura es favorecida por el enfriamiento más lento del metal que está en contacto con la pared de carbón que con la pared metálica.

Para la Figura 6c, Pared Carbón, en la fotomicrografía se observa una estructura característica de una fundición gris constituida esencialmente por hojuelas de grafito tipo D y formación de numerosas partículas de carburo, en una matriz perlítica.

IV. CONCLUSIONES

Una vez analizado los resultados obtenidos y tomando en cuenta los objetivos planteados en este trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- Se construyó dos moldes tipo cuña (molde metal-metal y molde metal- carbón) empleando las especificaciones de la norma ASTM A-367, con el espesor de muestra W4 (profundidad) de la norma, ya que es el que más se acerca a lo empleado en la planta..

- El estudio metalográfico de las muestras de fundición gris revela la presencia de una microestructura formada por dendritas de austenita transformada en perlita, con láminas de grafito tipo E y D, en el patrón de carga 100% Puntas aceradas; mientras que con un patrón de carga 100% Guardacabo se observa la presencia de dendritas primarias bien definidas, dendritas primarias de Austenita transformada en Perlita, láminas de grafito tipo C, Cementita y láminas de grafito tipo A, E y C. La composición química y las condiciones de enfriamiento, influye de forma directa en la formación de distintos tipos de grafito

- Se presume que el espesor límite para evitar la formación de fundición blanca (inadecuada para el proceso) es de 7 mm.

RECOMENDACIONES

- Se indica evaluar el efecto del patrón de carga sobre la velocidad de enfriamiento, al elaborar moldes tipo cuña, pero utilizando un espesor correspondiente a W 3 ½ que es inferior al usado en planta.

- Se sugiere emplear la relación de patrones de carga adecuada mezclando puntas aceradas y guardacabos, a medidas que permitan obtener una buena dureza en el material.

- Se recomienda cumplir con el porcentaje de ferroleaciones necesarias para el buen uso de los diversos

patrones de carga.

- Se aconseja el diseño de mecanismos de carga de la materia prima de manera de hacer más fácil la manipulación de estas al momento de cargar el Horno de Inducción.

REFERENCIAS

- [1]Bonilla Castro, E. y Rodríguez S. P. (2015). Más allá del dilema de los métodos: La investigación en ciencias sociales. Bogotá, Norma.
- [2]Bonilla, B. (2015). Reconstrucción y/o reparación de piezas de fundición gris, por medio de soldadura al arco (SMAW). Trabajo de Grado no publicado. Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala.
- [3]Cervo, A. y Bervin, P. (1989). Metodología Científica. (6ta. Edición). Madrid, Prentice Hall.
- [4]Galán, M. (2009). Manual de Investigación Social. Barcelona, McGraw Hill.
- [5]Hernández, Roberto; Fernández, Carlos y Baptista, María del Pilar. (2014). Metodología de la investigación. (Sexta edición).
- [6]México, McGraw-Hill Interamericana.
- Hurtado, Jacqueline. (2012). El proyecto de investigación Comprensión holística de la metodología y la investigación. (Octava Edición). Venezuela. Quirón.
- [7]Ingemecánica. Estudio y Clasificación de las Fundiciones. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html> (Consulta: 2024, marzo 23)
- [8]Losada, J.L. y López, R. (2003). Métodos de investigación en ciencias humanas y sociales. Madrid, Paraninfo.
- [9]Norma ASTM A-367. (2022). Standard Test Methods for Chill Testing of Cast Iron. Philadelphia, ASTM International.
- [10]Palella, Santa y Martins, Filiberto. (2017). Metodología de la investigación cuantitativa. (4ta. Edición). Caracas, Fedupel.
- [12]Rivas, I. (1992). Técnicas de Documentación Investigación I. UNA. Caracas, Venezuela.
- [13]Sabino, Carlos. (2018). El Proceso de Investigación. (Spanish Edition). San Diego, Mi Libro.

EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE DE ACERO RÁPIDO EN EL MECANIZADO DE BARRAS DE ACERO (AISI-1060)

Díaz Frank

frdiaz@unexpo.edu.ve

Unexpo, Departamento de ingeniería Mecánica, Centro de ingeniería de fabricación, Sección tecnología.

Resumen: El resumen de la evaluación se llevó experimentalmente en la empresa ROMIPLAST C.A. Obteniendo los valores de desgaste, medidos después de las pasadas de corte con micrómetros de exteriores, dichos valores se realizaron a diferentes velocidades de corte. Se evalúa con la ecuación de Taylor para obtener la vida útil de la herramienta, también se pudo obtener una relación avance-velocidad para un acabado específico de la superficie del material como es el acero dúctil con tratamiento de recocido y con una dureza de 160 HB (AISI-1060). El resultado obtenido nos sirve para comparar costos de mecanizado con este tipo de herramienta y a su vez se comparan el desgaste progresivo de la herramienta en comparación con el mecanizado de los ejes con otro tipo de herramienta.

Palabras Clave: Vida útil, acero rápido, desgaste progresivo.

TOOL LIFE ASSESSMENT OF A HIGH-SPEED STEEL CUTTING TOOL IN THE MACHINING OF STEEL BARS (AISI-1060)

Abstract: Abstract. The assessment was conducted experimentally at the company ROMIPLAST C.A. Wear values were measured with outside micrometers after each cutting pass. These values were obtained at different cutting speeds. Taylor's equation was used to evaluate the tool's service life, and a feed-rate relationship was also determined for a specific surface finish on the ductile, annealed steel with a hardness of 160 HB (AISI-1060). The results can be used to compare machining costs with this type of tool and, in turn, to compare the progressive wear of the tool with that of other tools used for machining shafts.

Keywords: Tool life, high-speed steel, progressive wear.



I INTRODUCCIÓN

En la fabricación de piezas cilíndricas por el proceso de torneado se evalúa el desgaste de la herramienta, este si es placas de widia calidad ISO montadas en porta herramientas tienen una mayor durabilidad; se debe a su recubrimiento.

En la empresa Romiplast se evaluará el desgaste de una herramienta de acero rápido (HSS) vulgarmente llamadas así por su alta dureza y elementos aleantes; también se les dice cuchillas de cobalto estas al mecanizar aceros de alto contenido de carbón se desgasta su filo cortante. Antiguamente se mecanizaban con estas herramientas, pero debido a la alta producción de piezas las herramientas han ido evaluando, llegando a obtener una vida útil muy alta. este trabajo se evalúa el costo y descartaremos el tiempo de mecanizado respecto a las herramientas de widia, el tiempo de vida se calculará según ecuación de Taylor y los desgastes sin tomar en cuenta su acabado superficial. El objetivo final será evaluar su durabilidad ya que esta herramienta es mucho más económica que las de widia.

El acero a mecanizar es muy usado por la empresa en la construcción de cilindros para sistemas hidráulicos, es un acero de alta resistencia mecánica y muy económico. El tipo de estudio es descriptivo aplicado es de diseño documental y experimental.

Los objetivos para este trabajo son los siguientes:

- Evaluar la vida de la herramienta, para el mecanizado del acero AISI- 1060

El cual genera unos específicos:

- Aplicar diferentes velocidades de avance
- Medir el desgaste de la herramienta con pasadas de corte a diferentes velocidades.
- Calcular la vida útil después de cada corte
- Comparar resultados y especificar la velocidad de corte más eficaz donde genere menos desgaste.

II MARCO REFERENCIAL

1.- Ecuación de Taylor: Lo importante en todo proceso de mecanizado es conservar por más tiempo la herramienta de corte, está según Taylor su durabilidad dependerá del material a trabajar y la velocidad de corte. Se define la vida de la herramienta como el tiempo de corte que puede operar la herramienta. Este tiempo de corte se puede definir de dos formas, bien como el tiempo

que transcurre hasta que se agota la herramienta produciéndose el fallo catastrófico, o bien, como el tiempo que se tarda en alcanzar la amplitud de la zona de des-

gaste en la cara de incidencia predeterminada por un criterio de desgaste definido. [1]

La ecuación de duración según Taylor (1907) es la siguiente:

$$V * T^n = C \quad (1)$$

Donde; V es la velocidad de corte, T el tiempo de vida útil para el mecanizado en una pasada, en nuestro caso el torneado; los valores de n y C son parámetros del material de trabajo determinadas experimentalmente.

Si los valores de vida de las herramientas para las tres curvas de desgaste en la figura 1, se trazan en una gráfica log-log de velocidad de corte contra la vida de las herramientas, la relación resultante es una línea recta, como se muestra en la figura 2. La ecuación 1 establece básicamente que las velocidades de corte más altas traen como consecuencia vidas más cortas para la herramienta. Al relacionar los parámetros n y C con la ecuación 1, n es la pendiente de la gráfica (expresada en términos lineales más que en la escala de los ejes) y C es la intersección sobre el eje de velocidad. C representa la velocidad de corte a la cual la herramienta duraría un minuto.

El problema con la ecuación 1 es que las unidades en el lado derecho de la ecuación no son consistentes con las unidades del lado izquierdo. Para hacerla consistente se debe multiplicar por un tiempo equivalente a 1 minuto con las unidades correspondientes al lado izquierdo. [2]

Para determinar los valores de C y n en la gráfica de la figura 2, se seleccionan dos de los tres puntos sobre la curva y se resuelven las ecuaciones simultáneas mediante la forma de la ecuación 1.

Seleccionando los dos puntos extremos: $v = 160$ m/min, $T = 5$ min y $v = 100$ m/min, $T = 41$ min; se tiene que

$$\begin{aligned} 160(5)^n &= C \\ 100(41)^n &= C \end{aligned}$$

Si se igualan los lados izquierdos de cada ecuación,

$$160(5)^n = 100(41)^n$$

Si se toman los logaritmos naturales de cada término,

$$\begin{aligned} \ln(160) + n &= \ln(100) + n \ln(41) \\ 5.0752 + 1.6094 n &= 4.6052 + 3.7136 n \\ 0.4700 &= 2.1042 n \end{aligned}$$

$$n = 0.4700 / 2.1042 = 0.223$$

Por lo tanto, la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas en los datos de la figura 2 es:

Y se sustituye este valor de n en cualquier ecuación inicial, se obtiene el valor de C :

$$VT^{0.223} = 229$$

$$C = 160(5)^{0.223} = 229 \quad \text{ó}$$

$$C = 100(41)^{0.223} = 229$$

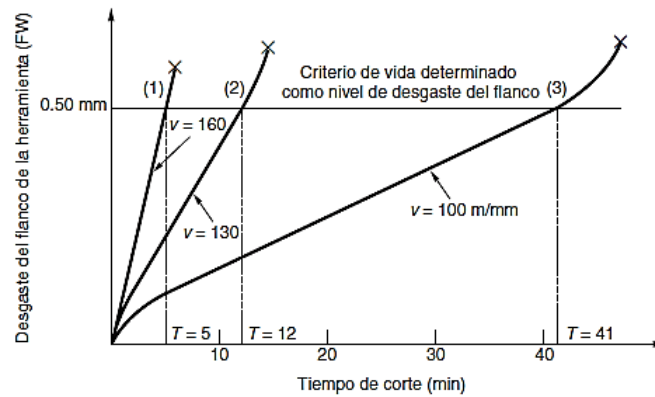


Figura 1. Efecto de la velocidad de corte sobre el desgaste de flanco (FW) o superficie de incidencia de la herramienta para tres velocidades de corte. [2]

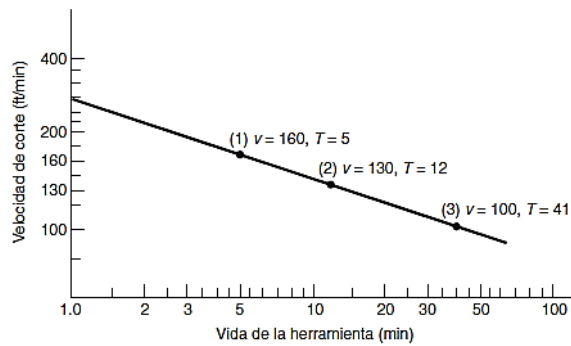


Figura 2: Gráfica en escala log-log de la velocidad de corte contra vida de la herramienta. [2]

Los materiales de las herramientas de corte logran esta combinación de propiedades en varios grados. En esta sección se analizarán los siguientes materiales de herramientas de corte: 1) aceros de alta velocidad y sus

predecesores, aceros simples al carbono y de baja aleación, 2) fundición de aleaciones de cobalto, 3) carburos cementados, cermetes y carburos recubiertos, 4) cerámicas.

Tabla 1. Valores representativos de n y C en la ecuación de la vida de las herramientas de Taylor, ecuación 1, para materiales seleccionados de herramienta. [2]

Material de herramienta	n	C			
		Corte con acero		Corte sin acero	
		m/min	ft/min	m/min	ft/min
Acero simple Al carbono	0,1	70	200	20	60
Acero de alta velocidad	0,125	120	350	70	200
Carburo Cementado	0,25	900	2700	500	1500
Cermet	0,25			600	2000
Carburo Recubierto	0,25			700	2200
Cerámico	0,6			3000	10000

Los valores de los parámetros son aproximados para torneado con avance = 0.25 mm/rev (0.010 in/rev) y profundidad = 2.5 mm (0.100 in). El corte sin acero se refiere a metales fáciles de maquinar, como aluminio, latón y hierro colado. El corte de acero se refiere al maquinado de acero suave (no endurecido). En la práctica se pueden encontrar variaciones significativas de estos valores.

Además de comparar las propiedades de los materiales, es útil compararlos en términos de los parámetros n y C en la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas. La invención de nuevos materiales para herramientas de corte ha incrementado en general los valores de estos dos parámetros. La tabla 1. proporciona una lista de valores representativos de n y C en la ecuación de Taylor para algunos materiales seleccionados de herramientas de corte. [2]

2.- Desgaste progresivo: Es el desgaste gradual de los filos de corte de la herramienta, producido por la fricción con la pieza. Es inevitable, pero con un buen análisis de las condiciones de mecanizado el proceso se puede optimizar. El desgaste gradual, es el único en el que se puede estimar la vida útil de la herramienta y sustituir esta sin afectar a la producción. Sin embargo, los fallos por fractura son impredecibles y repentinos por lo que afectan a la pieza sobre la que se está trabajando bien dejándola inservible o bien recuperable iniciando de nuevo la operación donde se produjo el fallo constituyendo una pérdida de tiempo y un incremento de costes de producción. [1]

3.- Ecuación de duración asociada a costo:

La ecuación asociada a el costo de la herramienta y al tiempo de mecanizado es la siguiente:

$$T_0 = \left(\frac{1}{n} - 1\right)(tc) + b * \frac{ch}{csm} \quad (2)$$

Dónde: T_0 es la duración del filo de la herramienta, tc , tiempo para cambio de la herramienta, $b = 1$ para costos mínimos y $b = 0$ para tiempos mínimos de mecanizado; ch es costo de la herramienta y csm son los costos de salario y mecanizado. El factor n tendrá un valor mayor a 0,1 y menor a 0,5 en una pasada.

4.- Herramienta de Corte: En las operaciones de mecanizado las herramientas de corte trabajan a elevadas temperaturas, sometidas a fricción y a importantes fuerzas. Por lo que es de esperar que la herramienta sea tenaz, que mantenga la dureza en un rango amplio de temperatura, que resista al desgaste que impone la fricción y que no reaccione con el material de la pieza incluso a altas temperaturas. [1]

4.1.- Aceros rápidos:

También conocidos como aceros de alta velocidad o HSS (High Speed Steels). Son aceros al carbono fuertemente aleados. Su introducción supuso un importante avance al permitir aumentar la velocidad de corte considerablemente ya que este tipo de acero mantiene su dureza a alta temperatura. Este material es muy tenaz lo que hace que se use para herramientas que van a estar sometidas a vibraciones elevadas o cortes interrumpidos. Aunque la gama de aceros rápidos es muy diversa, se pueden dividir en dos grupos

básicamente, tipo Tungsteno y tipo Molibdeno

- Tipo tungsteno: (grado-T) Los aleantes son: tungsteno (W), principalmente, además de cromo (Cr), vanadio (V), en menores proporciones, y los componentes básicos del acero. La proporción de tungsteno se encuentra entre 11,75 y 19%

- Tipo molibdeno: (grado-M) Incorpora a la aleación de acero rápido grado-T, molibdeno (Mo). La proporción en peso está entre el 3,25 y el 10 %.

A ambos tipos se le puede añadir también cobalto, ya que la adición de este material

aporta una mejora de la dureza en caliente de la herramienta.

4.2.- Aleaciones de fundición de cobalto:

Estas aleaciones se comenzaron a utilizar en torno a 1915 con el objetivo de poder aumentar las velocidades de corte. Su composición en peso está en torno a los siguientes márgenes,

- Cobalto: 38 – 53%
- Cromo: 30 – 33%
- Tungsteno: 10 – 20%

La aleación resultante es muy dura, alrededor de 60 HRC, por lo que tiene una mejor resistencia al desgaste que las herramientas de acero rápido, lo cual fue la razón de ser de su uso. Técnicamente posee características que se encuentran entre las herramientas de acero rápido y las de metal duro. Figuras 3 y 4.



Figura 3: Cuchilla de acero rápido (HSS) usada en el cilindrado, para evaluar su desgaste. Fuente: Romiplast C.A.



Figura 4: Cuchilla de acero rápido (HSS) usada en el Refrentado, para evaluar su desgaste. Fuente: Romiplast C.A.

5.- Cilindrado: es una operación realizada en el torno mediante la cual se reduce el diámetro de la barra de material que se está trabajando, ver figura 5.

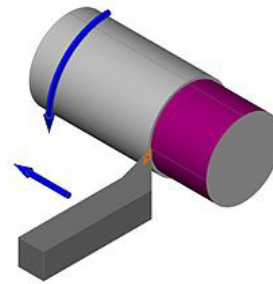


Figura 5. Cilindrado en Torno.

6.- Fluidos de corte: El fluido de corte es tan importante como el recubrimiento o la geometría de la herramienta. Una elección incorrecta del refrigerante puede hacer que la viruta no se evacue bien, o que la temperatura en el punto de trabajo supere la requerida para el proceso, lo que puede afectar las piezas. [5]

Para nuestra evaluación se usó aceite soluble en agua (taladrina), esta solución emulsificada es más efectiva contra el calentamiento de la herramienta y evita la corrosión en la superficie.

6.1.- Soluciones emulsificadas o emulsiones oleosas: son suspensiones de aceite en agua que se logran gracias a agentes emulsificantes y otros minerales (jabón o materiales jabonosos), los cuales rompen el aceite en pequeñas partículas y las mantienen dispersas en el agua.

6.2.- Soluciones semi-sintéticas: son una combinación de fluidos químicos con aceites emulsificables en agua. Específicamente, son emulsiones que contienen entre el 5 al 40% de aceite en la formulación y cuyo tamaño de partícula del aceite varía de 0.01 micras a 0.10 micras de diámetro. Poseen típicamente dos veces la cantidad de emulsificante en la formulación con respecto al aceite.

7.- Aceros alto carbón para herramientas

Los aceros de medio y alto carbón se usan para la fabricación de herramientas de trabajo para la industria ferretera en general, estas comercialmente martillos, picos, cizallas, destornilladores, palas y equipos de maquinaria pesada. El acero que más usado según norma estandarizada el de alto carbón AISI- 1060, este acero presenta propiedades mecánicas muy altas dependiendo de su tratamiento térmico; para este trabajo solo se le

dará un bonificado y dejarlo en su máxima dureza. Ver tabla 3.

Aceros de alto % de carbono (desde SAE 1055 a 1095) Se usan en aplicaciones en las que es necesario incrementar la resistencia al desgaste y altas durezas que no pueden lograrse con aceros de menor contenido de carbono.

En general no se utilizan trabajados en frío, salvo plaqueados o el enrollado de resortes. Prácticamente todas las piezas son tratadas antes de usar, debiéndose tener especial cuidado en estos procesos para evitar distorsiones y fisuras.

Las aplicaciones incluyen herramientas de mano tales como destornilladores, alicates y objetos similares. El conformado del acero 1060 puede ser hecho por los métodos convencionales, pero requiere más fuerza y presión que los aceros de bajo carbono.

Tabla 2. Composición Química del Acero AISI-1060. Fuente: Sumindu S.A

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Fe
0,55-0,65	0,15-0,35	0,60-0,90	0,04 Max	0,05 Max	Restante

Esta composición es según Norma AISI- 1060, las propiedades mecánicas varían según tratamiento térmico para una máxima dureza, lo esencial es un revenido a temperatura que oscila entre los 180 y 220 °C, esto se

debe realizar para su alivio interno en las tensiones del material y disminuir su fragilidad. Con este revenido se puede dejar la pieza con una dureza de hasta 52 HRC.

Tabla 3. Propiedades Mecánicas acero AISI-1060.Fuente: IIRSACERO

Temp. y Rev.	Resistencia a la Tensión Kg/Cm ²	Punto de Cedencia Kg/Cm ²	%Elong 50.8 mm	%Red. Área	HB
840-540°C	9600	6030	18	48	270
840-230 °C	1160	7500	30	56	480

III METODOLOGÍA

1.- La metodología a seguir es la siguiente:

Se preparan probetas de acero AISI-1060 para el mecanizado con herramientas de acero rápido, para evaluar la vida útil se tomaron parámetros de la máquina, seguido de unos cálculos de las velocidades de corte y medidas del desgaste. Finalmente se calculó la vida útil de la herramienta para predecir cual parámetro de avance y velocidad produce el desgaste mínimo.

A continuación, se procederá según estos pasos para el mecanizado de la probeta.

- Fijar el eje (pieza) al plato de tres mordazas.
- Ajustar el contrapunto con fuerza aproximada de 500 kg.
- Verificar la altura de la porta herramientas donde la punta del filo cortante esta al centro de la pieza.
- Apretar la herramienta de Carburo (HSS).
- Verificar el ángulo de posición del filo cortante.
- Seleccionar los avances (Va), los cuales serán de: 0.02; 0.1; 0.2. mm/rev.
- Seleccionar la velocidad de rotación (N) y el avance (f)
- Girar la pieza a 90 rpm. rozar con la punta de la

herramienta, retirar y aplicar una profundidad de corte de 0,5 mm en radio.

i) Realizar la primera pasada, esta pieza ya debería estar pre mecanizada.

j) Medir el tiempo de mecanizado en minutos.

k) Repetir las operaciones para los siguientes avances.

l) Medir el desgaste de la herramienta

En la metodología se realizaron los cálculos y se obtuvo la ecuación de Taylor para la vida útil de una herramienta de acero rápido (HSS).

El cambio o afilado nuevamente para ser usada se determinó con la ecuación de duración del filo asociada con el costo de la herramienta y el salario del operador. Es muy importante la refrigeración del filo en contacto con la pieza, esto disminuye el desgaste, el valor de C y n tienden a ser menores.

En la práctica experimental se mantuvo constante la

refrigeración del filo en las cuchillas. Los valores obtenidos del desgaste están acotados en la tabla 4 de la metodología.

La probeta (pieza) es un acero SAE- 1060, de longitud 200 mm y con un diámetro inicial de 50 mm, esta se pre mecanizó para limpiar la superficie se llevó a 45 mm de diámetro para los cálculos de velocidad de corte. Los parámetros para la evaluación y las medidas de desgaste están seleccionados como se especifican en la tabla siguiente tabla 4. El siguiente paso es el cálculo de la Velocidad de Corte de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_c = \pi * D_o * N / 1000$$

IV RESULTADOS

Los parámetros seleccionados para los cálculos

Tabla 4. Parámetros seleccionados.

Pasadas	Vc(m/min)	Va(mm)	Desgaste (mm)	Tiempo (min.)
1	12,72	0,2	0,12	30
2	12,44	0,1	0,09	35
3	12,16	0,02	0,05	40

1.- Para graficar en escala log-log de la velocidad de corte contra vida de la herramienta, se calcula el tiempo y este se grafica con la velocidad de corte. Figura 6

2.- Los resultados de los valores de C y n según cálculos y datos de la tabla 4, se seleccionan dos de las tres pasadas de corte sobre la pieza y se resuelven las ecuaciones simultáneas mediante la forma de la ecuación 1.

Seleccionando los dos puntos extremos: $v = 12,72$ m/min, $T = 30$ min y $v = 12,16$ m/min, $T = 40$ min; se tiene que

$$12,72(30)^n = C$$

$$12,16(40)^n = C$$

Si se igualan los lados izquierdos de cada ecuación,

$$12,72(30)^n = 12,16(40)^n$$

$$\ln(12,72) + n \ln(30) = \ln(12,16) + n \ln(40)$$

$$2.54 + 3.40 n = 2.49 + 3.68 n$$

$$0.5 = 0.28 n$$

$$n = 0.05 / 0.28 = 0,178$$

Sustituyendo el valor de n en ecuación 1 y despejando C.

$$C = 12,72(30)^{0,178} = 23,30$$

Por lo tanto, la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas en los datos experimentales es:

$$VT^{0,178} = 23,30$$

3.- Duración del filo de la herramienta asociada al costo, se determina para un tiempo de cambio de la herramienta de 25 minutos, con un costo de 25\$, para dicha herramienta, con costo de salario y mecanizado minimizando el costo a 6\$, se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_0 = \left(\frac{1}{0.178} - 1 \right) (25) + 1 * \frac{20}{6}$$

El filo para una pasada dura en una longitud de 200 mm del eje es de 118,78 minutos.

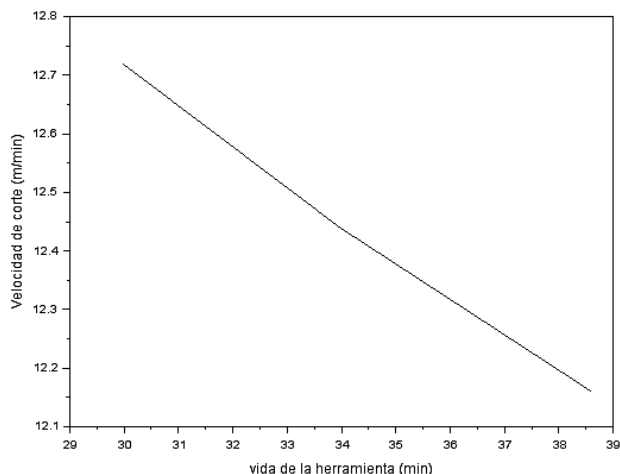


Figura 6. Gráfica en escala log-log de la velocidad de corte contra vida de la herramienta.

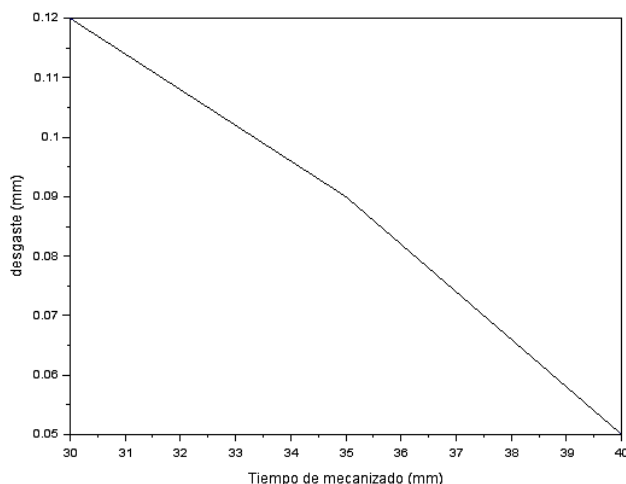


Figura 7. Gráfica del desgaste vs. El tiempo de mecanizado

V. CONCLUSIONES

Se puede concluir lo siguiente:

Los avances y las velocidades de corte deben ser menores para aumentar la vida de la herramienta, estos parámetros se pueden modificar según el tiempo requerido para el mecanizado.

- Los avances aplicados influye en el desgaste, a mayor avance aumenta la duración del filo cortante.
- Se midieron los desgastes una vez pasadas los cortes.
- Se calculó la vida útil después de cada corte
- La ecuación de Taylor obtenida solo aplica para

esta evaluación y material de la herramienta.

- La menor velocidad de corte de 12,16 m/min es la que genera menor desgaste en la herramienta

REFERENCIAS

- [1] Antonio Guarnido Barrera, Determinación de duración de herramientas de torno bajo diferentes condiciones de corte. 2007. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90290/fichero/2.+Materiales+-de+herramientas.pdf>
- [2] Mikell P. Groover, "Fundamentos de manufactura moderna" 2007 3ra Edición McGraw-Hill/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

- [3] Ignacio A. Enao, Optimización de las condiciones de corte, Revista EAFIT número 94.
- [4] García Javier Alejandro & Torralva María Josefina, Herramientas de corte: Determinación de vida útil en aceros de mediana y alta dureza, Instituto tecnológico de Buenos Aires, 2014.
- [5] Revista metal actual número 58, insumos 2015, www.metalactual.com Bogotá Colombia.
- [6] IISACERO, <http://iisacero.com.mx/>
- [7] Sumindu, <https://sumindu.com/>

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMOELÉCTRICO DE LAS UNIONES APERNADAS DE LAS BARRAS CATÓDICAS A LOS FLEXIBLES CATÓDICOS CON BIMETÁLICO COBRE ALUMINIO EN LA CELDA 129 DEL COMPLEJO I EN CVG VENALUM, C.A

Barreto Pedro, Lyon Edris, Rojas Francisco, Blanco Erwin y Maita Aymara.
(pedrobarretoj98, frojashdez37, erwin.mba95@gmail.com
UNEXPO VR Puerto Ordaz
(edris.lyon, aimara.maita)@venalum.com.ve
CVG VENALUM

Resumen: En este trabajo de investigación se evaluó el comportamiento termoeléctrico de las uniones apernadas de las barras catódicas de los flexibles catódicos en una celda de reducción aluminio P-19 con amperaje de 152 kA. Se definieron las variables que influyen en el comportamiento termoeléctrico de las uniones, las cuales fueron las 4 siguientes: propiedades termoeléctricas de los materiales, geometría de la unión, proceso de apernado y condiciones de servicio. Se verificaron los pasos para el montaje y desmontaje de celda. Se realizó un modelo termoeléctrico del apernado de la celda en las condiciones reales haciendo uso de software de análisis de elementos finitos, en donde se analizaron los resultados de las distribuciones de temperatura, diferencia de potencial eléctrico en varias partes del modelo de la celda. Obteniéndose como resultado una temperatura en barras catódicas de 253°C con diferencias a condiciones reales de solo 5% y una caída de potencial eléctrico de 43mV en las uniones apernadas simuladas, con apenas 2mV menos que lo medido experimentalmente. Se realizó la propuesta del diseño de un nuevo bimetálico con una mayor área de contacto para así mejorar la conducción eléctrica y térmica.

Palabras Clave: Celda reducción aluminio P-19, potencial eléctrico, simulaciones termoeléctricas, uniones apernadas

EVALUATION OF THE THERMOELECTRIC BEHAVIOR OF THE CATHODE BAR BOLTED JOINTS TO THE CATHODE FLEXIBLES WITH COPPER ALUMINUM BIMETALLIC IN CELL 129 OF COMPLEX I AT CVG VENALUM, C.A

Abstract: This research evaluated the thermoelectric behavior of the bolted joints of the cathode bars in the cathode flexibles of a P-19 aluminum reduction cell with an amperage of 152 kA. We defined the variables influencing the thermoelectric behavior of the joints, which were the following four: the thermoelectric properties of the materials, joint geometry, bolting process, and service conditions. We verified the steps for the assembly and disassembly of the cell. A thermoelectric model of the bolted joint of the cell was created under real conditions using finite element analysis software. The results of the temperature distributions and the electrical potential difference in various parts of the cell model were analyzed. We obtained a temperature of 253°C in the cathode bars, with a difference of only 5% compared to real conditions. The simulated bolted joints showed an electrical potential drop of 43 mV, which was just 2 mV less than the experimentally measured value. We proposed a new bimetallic design with a larger contact area to improve electrical and thermal conduction.

Keywords: P-19 aluminum reduction cell, electrical potential, thermoelectric simulations, bolted joints.



I. INTRODUCCIÓN

La Corporación Venezolana del Aluminio (Venalum) es una empresa del Estado Venezolano que se encarga de la producción de aluminio primario, proceso que se realiza en celdas electrolíticas o celdas de reducción de aluminio (CRA) mediante el proceso Hall-Héroult. Este proceso es una tecnología industrial continua para producir óxido de aluminio en forma de aluminio metálico. En el interior de la cuba de la celda se produce el fenómeno de oxido reducción en donde el oxígeno de la alúmina (Al_2O_3) se combina con el carbón (C) del bloque anódico para producir dióxido de carbono (CO_2) en forma de gas (burbujas) y el aluminio líquido (Al) que se precipita al cátodo de la celda. La energía necesaria para que el proceso ocurra proviene de una alta corriente directa, en el orden de cientos de kA, la cual debe mantener la temperatura en el baño electrolítico en aproximadamente $960\text{ }^\circ\text{C}$, con una variación de $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$.

Las CRA están conectadas eléctricamente en serie por lo que se necesita recoger toda la corriente del interior de una celda para transportarla hacia la siguiente celda más vecina. Las barras colectoras de acero del cátodo, que abreviaremos BCC, o barra catódica son las encargadas de hacer este trabajo. Hay dos sistemas de unión entre las BCC y sus flexibles catódicos de aluminio para sacar toda la corriente de una celda y llevarla a la próxima que son la soldadura, ver Figura 1 [1], y la unión apernada, Figura 2.

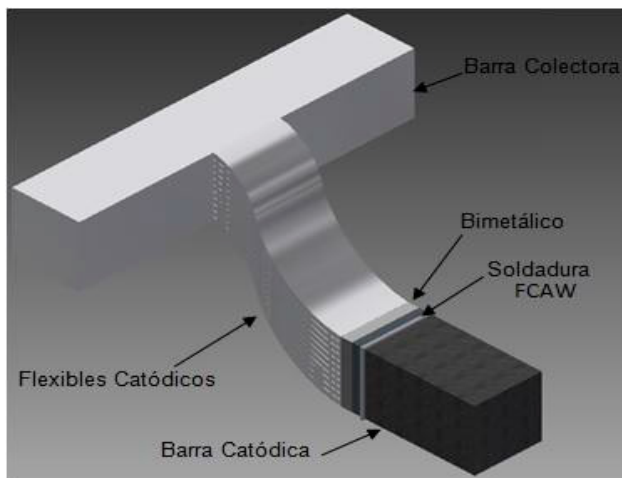


Figura 1: Unión soldada entre barras en celdas P-19

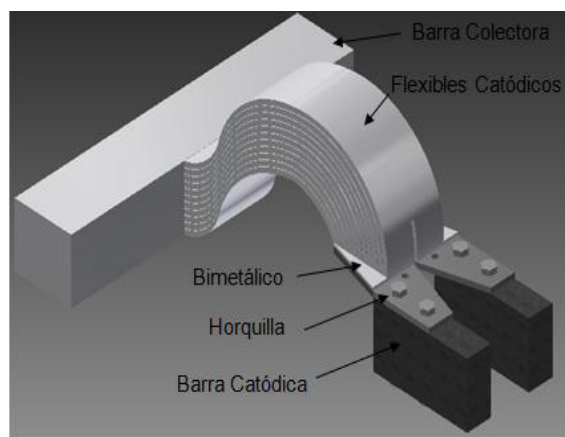


Figura 2: Uniones apernadas entre barras V Línea en las celdas Hall-230.

Las uniones soldadas se encuentran en todas las 720 celdas P-19 de CVG Venalum, las cuales operan a 156 kA y tienen en total 28 BCC, por lo que cada una debe recoger aproximadamente 5,57 kA. Las uniones apernadas se encuentran en V línea en todas sus 180 celdas Hall-230, que operan a 220 kA y tienen 76 BCC, por lo que cada una debe coleccionar 2,90 kA. Sin embargo, en la práctica estas BCC en una misma celda, ya sean apernadas o soldadas, no recogen la misma corriente, pero se sabe que mientras más distintas sean las corrientes entre ellas más ineficientes son las CRA [2]-[3].

Esta investigación es la primera que se realizó a objeto de proponer la sustitución del sistema de soldadura de las P-19 por un nuevo sistema de apernado. En esta etapa del proceso se usó en una CRA P-19 un sistema de apernado con el mismo bimetálico (aluminio) y horquilla (de cobre) usado en V línea. A través de mediciones experimentales de temperatura y caídas de potenciales eléctricos en el sistema de uniones de las BCC y flexibles del cátodo se logró comparar estas variables en los sistemas soldados y apernados.

Por otra parte, La facilidad de desmontaje y remontaje que proporcionan las uniones apernadas puede mejorar considerablemente la eficiencia en el mantenimiento y las reparaciones, lo que a su vez tiene el potencial de reducir el tiempo de inactividad de los equipos o estructuras, mejorando la productividad general de la instalación, puede mitigar los riesgos laborales, contribuyendo a un entorno laboral más seguro y al cumplimiento de las normativas de salud y seguridad.

II. DESARROLLO

2.1 Verificar las operaciones para la realización

del desmontaje y montaje de la superestructura y cátodo de las celdas P-19

El primer paso de la investigación consistió en una visita preliminar a la celda a desincorporar, lo que permitió obtener una comprensión detallada de la configuración actual y identificar los elementos clave a considerar durante el proceso. Esta inspección in situ fue fundamental para evaluar el estado general de la estructura y el cátodo, anticipar posibles desafíos técnicos y logísticos, y planificar efectivamente las etapas subsiguientes del proyecto. En el segundo paso se realizó

una inspección detallada de la condición actual de las conexiones entre la barra catódica y la barra colectora. Esta evaluación minuciosa fue crucial para verificar la integridad y el estado de estas conexiones, identificar áreas de desgaste, corrosión u otros deterioros que podrían afectar la eficiencia y seguridad de las operaciones de desmontaje y montaje. Al asegurar la robustez de estas conexiones, se estableció una base sólida para garantizar la ejecución exitosa de las siguientes fases del proyecto.

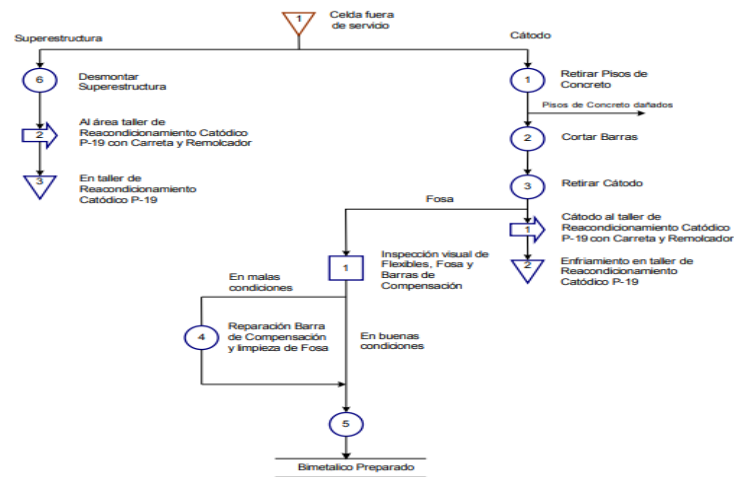


Figura 3: Proceso del desmontaje de celdas P-19 [4]

El tercer paso involucró el análisis de datos recolectados a través de entrevistas no estructuradas a trabajadores y soldadores. La información obtenida proporcionó una visión detallada de los procedimientos operativos, los desafíos comunes, las prácticas recomendadas y las posibles áreas de mejora identificadas por aquellos directamente involucrados en las actividades de desmontaje y montaje.

2.2 El modelo y sus condiciones termoelectricas de bordes.

Se creó el modelo computacional del apernado que se muestra en la Figura 3, junto al modelo soldado. El modelo apernado se insertó en el modelo computacional de la celda P-19, ver Figura 4, ya existente, pero sólo en dos de las barras colectoras de un mismo cátodo, hay en total 14 bloques del cátodo lo que implica 28 barras colectoras.

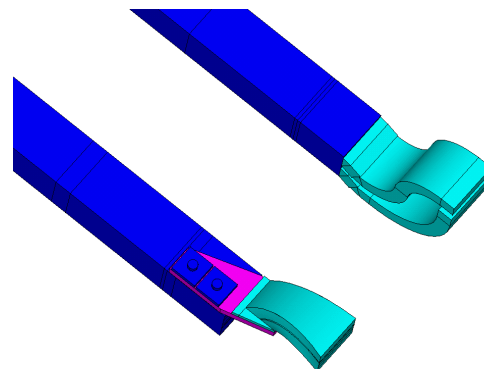


Figura 3: Comparación entre el modelo de apernado, barra 11, de prueba y el modelo de flexibles de soldado, barra 12.

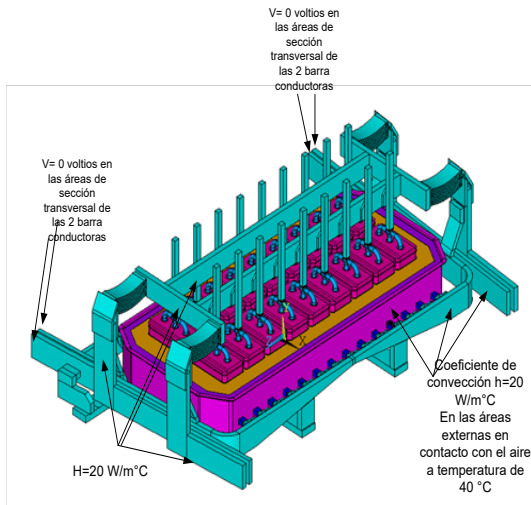


Figura 4.: Modelo de celda de reducción de aluminio P-19 con sus condiciones de bordes .

El modelo tiene un total de 16 materiales distintos, dos más que el modelo de flexibles soldados porque se le agrega el cobre y el acero de los tornillos del sistema apernado. El modelo de la celda completa con sus dos apernados fue mallado para total de 1.038.626 nodos. Las condiciones de borde usadas son similares a las usadas en varias investigaciones realizadas entre C.V.G VENALUM y la UNEXPO [5]-[6]-[7], pero en el sistema anódico se usaron las utilizadas en [8], Figura 5.

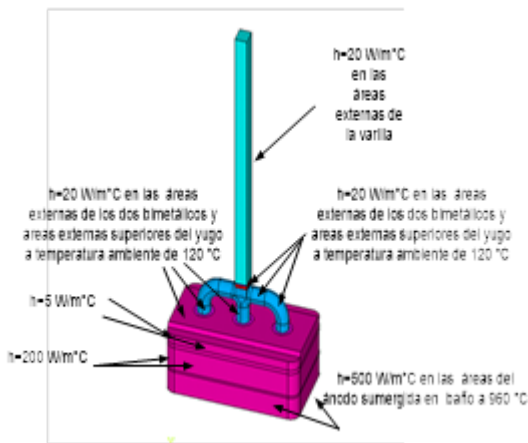


Figura 5: Condiciones de borde usadas para el sistema anódico.

Los materiales, componentes de las celda, las ecuaciones termoeléctricas que resuelve el programa y su correspondiente validación de resultados termoeléctricos están en [8].

2.3 Resultados y discusión de las simulaciones.

En las Figuras 6 y 7 se muestran los resultados para la distribución de temperatura y de caída de potencial eléctrico o voltaje en las barras colectoras de acero del cátodo, respectivamente.

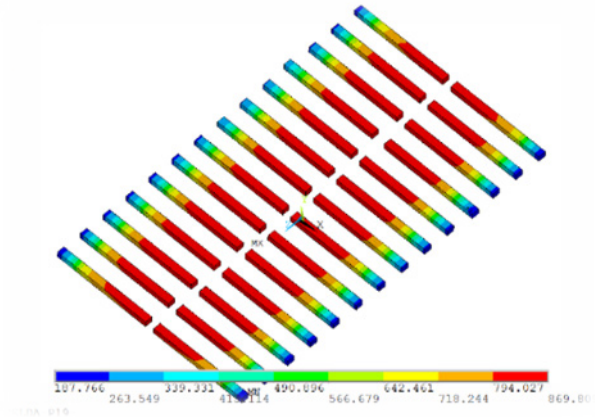


Figura 6: Distribución de temperatura en las BCC.

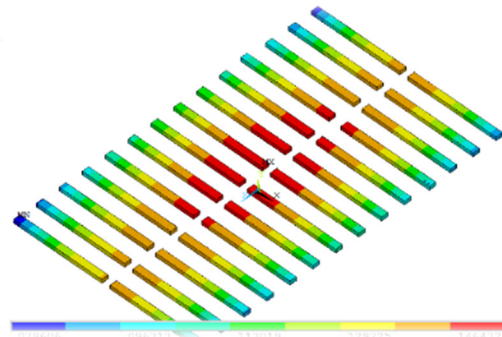


Figura 7. Distribución de voltaje en las BCC.

Se observa claramente que el sistema de apernado que están en las barras colectoras 11 y 25 no altera en general sus distribuciones de temperatura y de voltaje. Se realizaron varias mediciones de caída de potencial en el apernado donde se tomaron en cuenta los 3 puntos de referencias que se muestra en la Figura 8: hay dos caídas de potenciales en esos tres puntos.

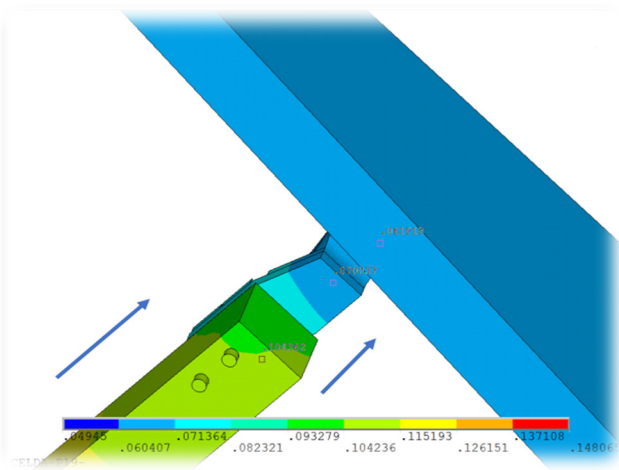


Figura 8: Distribución de voltaje en las BCC.

La caída de potencial entre la barra colectora de acero y bimetálico de aluminio fue medido entre los puntos uno (mayor potencial) y dos (potencial intermedio), teniendo como resultado 0,035V aproximadamente y una caída entre el bimetálico y la barra colectora del anillo de celda, medido entre los puntos dos y tres, que arrojó una caída de potencial 0,0082V aproximadamente. Para obtener una caída total en el apernado de 0,043V, un valor que entra en el rango experimental de lo medido la celda.

En la Figura 9 se observa las temperaturas en un punto registradas en las barras con bimetálico soldado, que mostraron valores de 258°C y 264°C y en la barra

apernada que mantuvo una temperatura de 258°C

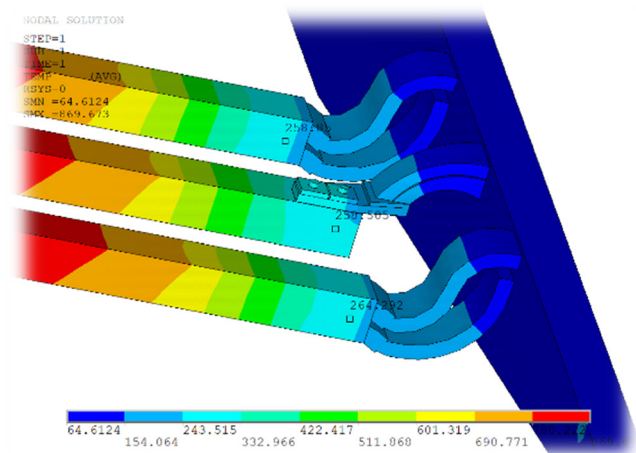


Figura 9: Temperatura en barras soldadas y la barra apernada

Este estudio muestra una diferencia pequeña pero no significativa entre la barra apernada y la barra soldada, lo que permite constatar que la aplicación de flexibles apernados satisface los requisitos establecidos, ya que las temperaturas observadas en condiciones de funcionamiento son muy cercanas entre sí. Se observa de la Tabla 1 la concordancia entre los valores de temperatura medidos en la zona del extremo afuera de las barras y los obtenidos en las simulaciones, para la barra 11, la apernada, se midió experimentalmente 252 °C

**TABLA I
TEMPERATURA EN LAS BCC EN SUS EXTREMOS HACIA AFUERA**

BCC	AGUAS ARRIBA TEMPERATURAS °C	Aguas abajo Temperaturas °C*
1	240	230
2	281	266
3	293	257
4	287	253
5	253	252
6	254	239
7	249	252
8	264	246
9	259	249
10	243	243
11	252	251
12	242	249
13	245	268
14	190	200

En la Figura 10 se presenta el resultado de la simulación para las caídas de voltaje total entre las BCC y las barras colectoras del anillo o "busbar" del anillo de celda. En la Tabla 2 se muestra el resultado de las medidas experimentales para las caídas de voltaje en los puntos señalados en la simulación para todas las uniones BCC y el "busbar" del anillo.

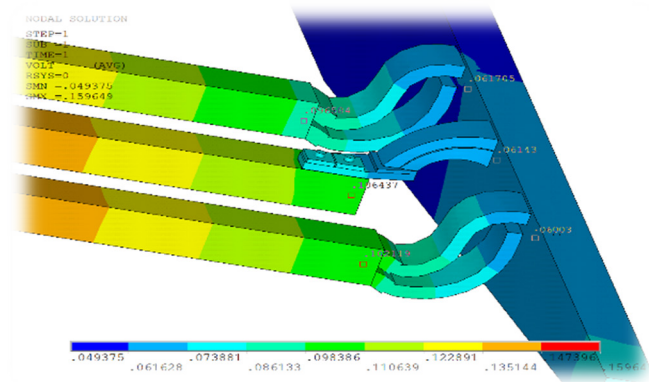


Figura 10: Caídas de voltaje en las uniones soldadas y apernadas.

**TABLA II
CAÍDAS DE VOLTAJE EN LAS CONEXIONES DE LAS BCC Y LA BARRA COLECTORA DEL ANILLO DE CELDA**

BCC	AGUAS ARRIBA VOLTAJE mV	Aguas abajo Voltaje mV
1	33	31
2	64	38
3	44	44
4	52	39
5	39	34
6	37	38
7	36	36
8	55	33
9	37	39
10	42	52
11	45	44
12	43	38
13	43	41
14	25	27

Los resultados muestran que en la zona de las barras catódicas se registraron potenciales de 0.096584 V y 0.102118 V en las uniones soldadas, y de 0.106437 V en la unión apernada. En la zona de la barra del anillo del "busbar" (zona de color azul), se obtuvieron potenciales de 0.061705 V y 0.06003 V para las uniones soldadas, y de 0.06143 V para la unión apernada. Realizando los cálculos correspondientes, se determinó que la caída total de voltaje en las 3 uniones fue de 0.034879 V y 0.042088 V para las uniones soldadas, y de 0.045007 V para la unión apernada. Se observa una diferencia no tan significativa entre una unión y otra; y tampoco hay significativa diferencia entre las medidas experimentales para las caídas de potenciales en todo el conjunto de

las 28 barras que se muestran en la Tabla 2.

2.4 Propuesta de un nuevo sistema de apernado para optimizar su funcionamiento y reducir los riesgos de fallas o averías

Es importante destacar que el modelo de apernado usado experimentalmente se correspondió con el modelo apernado que actualmente tienen las celdas Hal-230 de C.V.G. Venalum, el cual no resulta muy adecuado porque el área de contacto de la unión apernada no cubre toda la superficie de la barra catódica, lo que implica en una caída de voltaje o potencial eléctrico más elevado, porque a menor área mayor es la resistencia eléctrica entre los contactos. Por tal motivo se propone

un nuevo sistema de apernado que cubra todo el área de contacto entre el apernado y las barras colectoras de acero que se muestra en las Figuras 11 y 12.

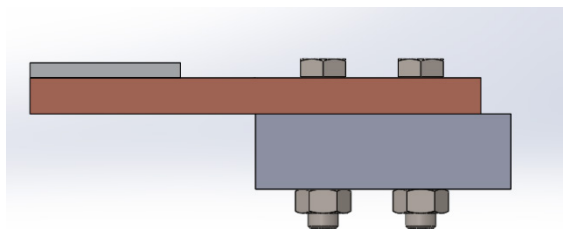


Figura 11: Propuesta de nuevo modelo de apernado

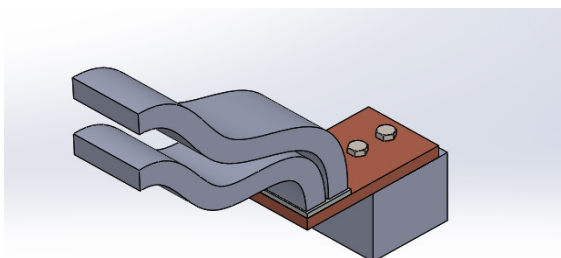


Figura 12: Propuesta de nuevo modelo de apernado

Actualmente se están realizando simulaciones con el nuevo sistema de apernado propuesto para estudiar su eficiencia eléctrica con el fin de desarrollar un proyecto para implementarlo experimentalmente en al menos una celda P-19 con completa, en todas sus barras colectoras.

III. CONCLUSIONES

Las variables críticas que determinan el comportamiento de las uniones apernadas incluyen: propiedades termo-físicas de los materiales (conductividad eléctrica, coeficiente de expansión térmica, módulo elástico); parámetros geométricos que definen el área de contacto efectiva, concentración de tensiones y anclaje mecánico; características del proceso de ensamble como torque de apriete, rugosidad superficial y tratamientos térmicos; así como las intensas condiciones termo-electromecánicas de operación con corrientes elevadas, ciclos térmicos severos y esfuerzos mecánicos oscilantes. Tras el seguimiento y documentación detallada de los trabajos reales de mantenimiento mayor sobre la celda P-19, se verificó el procedimiento para realizar el desmontaje y montaje de la superestructura y cátodo enfocándose en las tareas críticas de extracción y reinstalación, se logró estandarizar cada actividad en secuencias defini-

das de operaciones. Se logró realizar satisfactoriamente las validaciones térmica y eléctrica del modelo usado, lo que implica que se tiene una herramienta de cálculo lo suficientemente exacta para proponer modificaciones en el modelo y en la celda real con una alta probabilidad de éxito. Se recomienda realizar simulaciones para el estudio termo mecánico de la celda P-19 con uniones apernadas.

REFERENCIAS

- [1] N. Gutiérrez, "Evaluación De La Conexión Barra Catódica - Barra Colectora De Las Celdas De Tecnología Reynolds P-19 De Venalum". Tesis de grado Ingeniería Industrial UNEXPO 2010.
- [2] A. Kjar, J. Keney and D. Severo. (2022, enero). Evolution of busbar design for aluminum reduction cells. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/357578011_evolution_of_busbar_design_for_aluminium_reduction_cells
- [3] A. Arkhipov, A. Alzarooni, A. Al Jasmi and V. Potocnik, "Improving the Understanding of Busbar Design and Cell MHD Performance", Light Metal, pp. 671-677, 2013.
- [4] Diagramas de procesos CVG Venalum (*).
- [5] F. Rojas, A. Birrot y I. Malave, "Simulación de las Caídas de Potenciales en el Sistema Anódico Producidas por las Variaciones de Profundidad del Yugo en el Ánodo de un Celda de Reducción de Aluminio", Universidad, Ciencia y Tecnología, vol. 43, pp. 79-86, 2007.
- [6] F. Rojas, A. Birrot, D. Requena y I. Malave, "Propuestas de mejoras en el Sistema Anódico en Celdas Hal-230 de V línea de CVG VENALUM", Universidad, Ciencia y Tecnología, vol. 56, pp. 238-243, 2010.
- [7] F. Rojas, I. Malave y A. Birrot, "Nuevo Modelo del Sistema Anódico para Mejorar la Eficiencia Eléctrica en las Celdas de Reducción de Aluminio HAL-230 de CVG VENALUM", Universidad, Ciencia y Tecnología, vol. 65 pp.189-203, 2012.
- [8] H. Fortin; N. Kandev and M. Fafard, "FEM Analysis of Voltage Drop in the Anode Connector Induced by Steel Stub Diameter Reduction", Finite Elements in Analysis and Design, vol.52, pp. 71-82, 2012
- [9] F. Rojas; A. Maita; A. Birrot y J. Rendón, "Simulación Termoeléctrica de las Celdas de reducción de aluminio P-19 de C.V.G Venalum". por publicar.

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA DE RESISTENCIA POR PUNTOS (RSW) EN LÁMINAS: GALVANIZADAS, DE ALUMINIO Y GALVANIZADAS CON VARILLAS DE ACERO

Andreina Mora, Miriam Romero, Nerismar Angulo, Giorgio Aceto

andreina.mora06@gmail.com, mromero@unexpo.edu.ve, nerisar@gmail.com, giorgioaceto2@gmail.com
Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO) Vicerrectorado de Puerto Ordaz, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Centro de soldadura y ensayos mecánicos. Puerto Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela.

Resumen: La soldadura por puntos pertenece al grupo de tecnologías de soldadura por resistencia. Los parámetros básicos del proceso son la corriente, tiempo de soldadura y presión de apriete de los electrodos. Esta investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de los parámetros de soldadura por resistencia sobre las propiedades de las juntas en láminas de acero galvanizado en caliente, láminas de aluminio y la relación láminas de acero galvanizada con varilla de acero. Se implementaron variaciones a los parámetros de soldadura y se estudiaron los efectos sobre la geometría y microestructura del punto, diámetro del botón de soldadura (nugget), con el fin de obtener perfiles que estén en el rango permitido según la norma ISO 10447 y el código ASME Sección IX que establecen los análisis macroscópicos para determinar la calidad de la soldadura.

Palabras Clave: Ciclo, electropunto, botón, recubrimiento

EVALUATION OF THE RESISTANCE SPOT WELDING (RSW) PROCESS ON SHEETS: GALVANIZED, ALUMINUM, AND GALVANIZED WITH STEEL RODS

Abstract: Spot welding is a type of resistance welding technology. The basic parameters of the process are current, weld time, and electrode clamping pressure. This research aims to evaluate the effect of resistance welding parameters on the joint properties of hot-dip galvanized steel sheets, aluminum sheets, and the relationship between galvanized steel sheets and steel rods. Variations in welding parameters were implemented, and their effects on the spot geometry, microstructure, and weld nugget diameter were studied. The goal was to obtain profiles within the permissible range according to ISO 10447 and ASME Section IX, which establish the macroscopic analyses for determining weld quality.

Keywords: Cycle, spot welding, nugget, coating.



I. INTRODUCCIÓN

La soldadura de resistencia eléctrica por puntos se basa en el calentamiento que se produce en los materiales por el paso de corriente, la resistencia propia que cada material ofrece al paso de la corriente eléctrica genera un calentamiento localizado hasta llegar a la temperatura de forja de los materiales, simultáneamente se aplica fuerza o presión sobre electrodos necesaria para que las piezas a unir queden soldadas.

Este tipo de soldadura es la utilizada mayormente por los fabricantes para el ensamblaje de las piezas que forman las carrocerías de los vehículos, amplia aplicación en sector naviero, aviación y electrodoméstico. Lo característico de este proceso es la soldadura que resultan, uniones lisas sin protuberancias o concavidades sobre láminas o perfiles que abarque espesores de 0,5 mm a 6 mm.

Los aceros que tienen recubrimientos de protección catódica contra agentes corrosivos como el galvanizado en caliente, presentan inconvenientes durante el proceso de soldadura. El principal problema que se enfrenta al soldar aceros galvanizados es el ajuste de programación, la presencia zinc en las superficies de los aceros disminuye la resistencia de contacto de las interfases requiriendo un mayor aporte de corriente de soldadura para formar satisfactoriamente el botón de soldadura, se requiere de más ciclos de sujeción previos al paso de la corriente a manera de contrarrestar la resistencia eléctrica tanto del acero como del recubrimiento. Además, se provoca el rápido deterioro de los electrodos, afectando la microestructura de la zona de fusión.

Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo estudiar la evaluación de la soldadura por electropunto en láminas de acero galvanizadas por inmersión en caliente, láminas de aluminio y la unión por soldadura de láminas galvanizada por inmersión en caliente con varilla de acero estriada.

Para obtener los resultados de este trabajo se determinó la calidad de la soldadura de electropunto, mediante ensayos no destructivos de cincel, ensayo destructivo de desabotonado. Así mismo, se efectuó el análisis microestructural a través de microscopía óptica (MO) y lupa estereoscópica.

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A. Realizar ensayo no destructivo de cincel para determinar la adherencia cumpliendo ISO 10447:2022.

El ensayo permite determinar la resistencia de la soldadura de una manera sencilla. El procedimiento se

describe a continuación:

Utilizando cincel y martillo como herramientas, se realiza la prueba de la siguiente manera (ver Figura N° 1):

1. Se inserta el cincel en la unión de las dos láminas y entre dos puntos de soldadura.

2. Se golpea fuertemente y repetidas veces en cincel con el martillo a un ángulo aproximadamente de 45° entre las láminas.

3. Si el punto de soldadura no se desprende, se califica como “bueno” de lo contrario será calificado como “malo”.

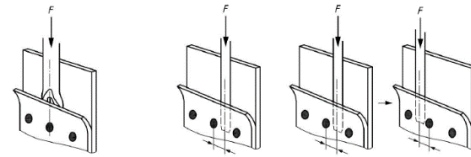


Figura N° 1. Descripción del ensayo destructivo de adherencia [15]

B. Evaluar el tipo de falla por ensayo destructivo de pelado y determinar tamaño de huella promedio bajo la norma ISO 10447:2022.

Tiene por propósito realizar mediciones en los puntos de soldadura, además se deben despegar las láminas que han sido unidas previamente, permitiendo caracterizar el tipo de falla que se presenta al separarlas.

La medición de los diámetros se realiza perpendicularmente a cada punto (ver Figura N° 2) para luego sacar un promedio del tamaño de soldadura requerido según el espesor de la lámina de trabajo.

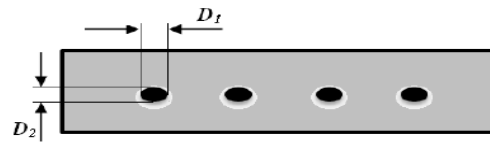


Figura N° 2. Descripción de la medición de los puntos de soldadura.

A continuación, la Figura N° 3 se ilustra las etapas del ensayo destructivo Peel:

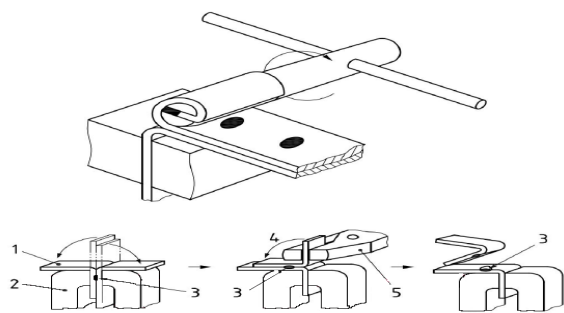


Figura N° 3. Descripción del ensayo de desabotonado [15]

Las mediciones colectadas se registran bajo las siguientes condiciones:

-Calidad superficial: Se relaciona con la existencia de imperfecciones en el punto de soldadura.

oAdecuada: No existe ninguna imperfección.

oIrregular: Presencia de expulsión de material fundido, marcado excesivo por el electrodo.

-Resistencia al corte: Se refiere a la oposición que ofrece el punto de soldadura en la lámina al ser desprendida.

oFuerte: Difícil desprendimiento.

oDébil: Facilidad a ser desprendida.

-Tipo de falla: El tipo de falla es determinante para evaluar si califica o no el punto, en la evaluación mecánica.

oDesgarramiento: Se presenta cuando en una de las láminas queda totalmente adherida al botón de soldadura

ra y en la otra queda un hueco.

oCizallamiento: Cuando al separar ambas láminas queda una marca en cada una de ellas rompiéndose solo el punto de soldadura.

C. Caracterizar los puntos de soldadura microestructuralmente, cumpliendo código ASME sección IX

Se procede a la preparación de muestras para la caracterización metalográfica de acuerdo a las siguientes normas:

-ASTM E3

-ASTM 407

Dichas normas detallan los procedimientos operaciones para realizar en el corte transversal, montaje, desbaste, pulido y ataque a las muestras para el respectivo análisis micrográfico.

Se hace uso de equipos:

-Lupa Estereoscópica: Se emplea para la inspección macrográfica, garantizando el cumplimiento del código QW-196.1 de la sección IX del código ASME, que establece que la inspección de la sección transversal deberá ser examinada a 10X.

-Microscopio Óptico: Se evalúan los perfiles para tener mayor criterio evaluativos.

III.RESULTADOS

Se muestran a continuación los parámetros planteados para la evaluación de soldadura de resistencia eléctrica por electropunto para soldar dos láminas galvanizadas.

Tabla N° 1. Parámetro de operación propuestos para laminas galvanizadas de 1,5mm.

Lote	P electrodo (Bar)	t aprox. (Ciclo)	t soldadura (ciclo)	Soldadura (A)	N° de pulsos	Intervalo de pulsos (Ciclo)	t enfriamiento (Ciclo)	t repetición (Ciclo)
I	3	13	50	6824	2	2	44	50
II	3	13	50	5746	2	2	44	50
III	3	13	85	2155	2	2	44	50
IV	2	13	20	5746	1	1	44	50
V	3	13	20	5746	1	1	44	50
VI	2,5	50	40	5746	1	1	44	50
VII	2	50	40	7111	1	1	44	50
VIII	2	50	40	6465	1	1	44	50
IX	2	50	40	6105	1	1	44	50
X	3,5	50	40	5746	1	1	44	50
XI	3,5	50	40	6465	1	1	44	50
XII	3,5	50	40	7111	1	1	44	50
XIII	3,5	50	40	6824	2	1	44	50

Tabla N° 2. . Parámetro de operación propuestos para láminas de aluminio de 0,5mm

Lote	P electrodo (Bar)	t aprox. (Ciclo)	t soldadura (ciclo)	Soldadura (A)	N° de pulsos	Intervalo de pulsos (Ciclo)	t de mantenimiento (Ciclo)	t de repetición (Ciclo)
I	3	13	30	3591	1	1	44	50
II	3	13	30	2873	1	1	44	50
III	2	13	20	3591	1	1	20	50
IV	2	10	20	2155	1	1	10	50
V	1,5	10	20	2155	1	1	10	50

Tabla N° 3. Parámetro de operación propuestos para laminas galvanizadas de 1,5mm y varillas de acero de 4,5 mm Ø.

Lote	P electrodo (Bar)	t aprox. (Ciclo)	t soldadura (ciclo)	Soldadura (Amp)	N° de pulsos	Intervalo de pulsos (Ciclo)	t de mantenimiento (Ciclo)	t de repetición (Ciclo)
I	2,5	64	8	5100	1	1	44	50
II	2,5	64	8	5746	1	1	44	50
III	2,5	50	20	6105	1	1	44	50
IV	2,5	50	10	5746	1	1	44	50
V	2,5	40	10	5746	1	1	44	50

A. Adherencia obtenida por norma ISO 10447:2022. destructivo de cincel, se registra la información de cada punto inspeccionado visualmente.

La siguiente tabla recopila el resultado del ensayo no

Tabla N° 4. Evaluación de adherencia en lámina 1.5 mm galvanizada

ENSAYO DESTRUCTIVO				
Muestra	Punto	Adherencia	Resistencia al impacto	Calificación
I	1	Si	Fuerte	Aceptable
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable
II	1	Si	Fuerte	Aceptable
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable
III	1	No	Débil	Rechazado
	2	No	Débil	Rechazado
	3	No	Débil	Rechazado
	4	No	Débil	Rechazado
IV	1	Si	Débil	Rechazado
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable
V	1	No	Extrafuerte	Aceptable
	2	No	Extrafuerte	Aceptable
	3	No	Extrafuerte	Aceptable
	4	No	Extrafuerte	Aceptable
VI	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable
	4	Si	Extrafuerte	Aceptable
VII	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable
	4	Si	Extrafuerte	Aceptable
VIII	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable

IX	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable
	4	Si	Extrafuerte	Aceptable
X	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable
	4	Si	Extrafuerte	Aceptable
XI	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable
	4	Si	Extrafuerte	Aceptable
XII	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable
	4	Si	Extrafuerte	Aceptable
XIII	1	Si	Extrafuerte	Aceptable
	2	Si	Extrafuerte	Aceptable
	3	Si	Extrafuerte	Aceptable
	4	Si	Extrafuerte	Aceptable

Aplicación de ensayo no destructivo sobre los puntos de soldadura, resultando casi la totalidad de las probetas ensayadas como aceptables según lo referido a la norma ISO 10447, calificando como aceptable los pará-

metros planteados para la evaluación no destructiva por cincel, excepto el parámetro propuesto de la probeta V que corresponde a $P=3$ Bar, $T_a=0,26$ s, $T_s=0,4$ s, $T_m=0,88$ s y 5746 A.

Tabla N° 5. Evaluación de adherencia en lámina de aluminio 0.5 mm

ENSAYO DESTRUCTIVO				
Muestra	Punto	Adherencia	Resistencia al impacto	Calificación
I	1	No	Débil	Rechazado
	2	No	Débil	Rechazado
	3	No	Débil	Rechazado
	4	No	Débil	Rechazado
II	1	Si	Débil	Rechazado
	2	Si	Débil	Rechazado
	3	Si	Débil	Rechazado
	4	Si	Débil	Rechazado
III	1	Si	Débil	Rechazado
	2	Si	Débil	Rechazado
	3	Si	Débil	Rechazado
	4	Si	Débil	Rechazado
IV	1	No	Débil	Rechazado
	2	No	Débil	Rechazado
	3	No	Débil	Rechazado
	4	No	Débil	Rechazado
V	1	No	Débil	Rechazado
	2	No	Débil	Rechazado
	3	No	Débil	Rechazado
	4	No	Débil	Rechazado

Ensayo aplicado a juntas formada por dos láminas de aluminio, no califica ninguna. Todos los puntos inspeccionados presentan baja resistencia al impacto, ninguna adherencia aceptable.

Tabla N° 6. Evaluación de adherencia en lámina galvanizada de 1,5 mm con varillas de acero de Ø 4,5 mm

ENSAYO DESTRUCTIVO				
Muestra	Punto	Adherencia	Resistencia al impacto	Calificación
I	1	Si	Fuerte	Aceptable
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable
II	1	Si	Fuerte	Aceptable
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable
III	1	Si	Fuerte	Aceptable
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable
IV	1	Si	Fuerte	Aceptable
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable
V	1	Si	Fuerte	Aceptable
	2	Si	Fuerte	Aceptable
	3	Si	Fuerte	Aceptable
	4	Si	Fuerte	Aceptable

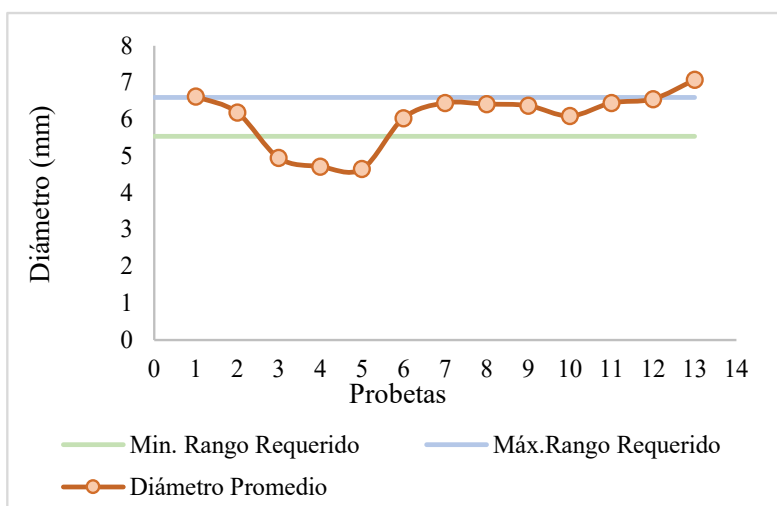
Todos los puntos analizados por ensayo de cincel mostraron fuerte resistencia al impacto, ningún punto se desprendió, calificando como aceptable todos los parámetros propuestos.

B.Tipo de falla y tamaño de huella promedio obtenido por norma ISO 10447:2022

La siguiente tabla recopila el resultado del ensayo destructivo de pelado, aplicado a cada probeta, se registra la información de cada punto inspeccionado visualmente.

Tabla N° 7. Evaluación del tipo de falla y medición del punto de soldadura en probetas de acero galvanizado de 1,5 mm

INSPECCIÓN VISUAL				
Muestra	Calidad superficial	Resistencia al corte	Tipo de falla	D prom (mm)
I	Irregular	Fuerte	Desgarramiento	6,625
II	Irregular	Fuerte	Desgarramiento	6,187
III	Adecuada	Débil	Cizallamiento	4,95
IV	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	4,718
V	Adecuada	Débil	Cizallamiento	4,65
VI	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	6,037
VII	Irregular	Fuerte	Desgarramiento	6,45
VIII	Irregular	Fuerte	Desgarramiento	6,418
IX	Irregular	Fuerte	Desgarramiento	6,375
X	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	6,093
XI	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	6,45
XII	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	6,556
XIII	Regular	Fuerte	Desgarramiento	7,075

**Figura N° 4. Gráfica del diámetro promedio obtenido en la evaluación láminas galvanizadas de 1,5 mm**

De la Figura N° 4 se puede apreciar que la mayoría de los valores parámetros están en el rango permisible. Las probetas ensayadas de los parámetros N° II, VII, VIII y IX no califican por presentar reborde o indentación excesiva como resultado de la inspección visual expresadas en la Tabla N° 7. Los parámetros N° VI, X, XI y XII se acercan más a lo deseado, pues los valores del diámetro del botón están entre el rango adecuado permisible, los diámetros promedios totales de éstas

muestras cumplen con todos los requerimientos apropiados en la inspección visual, presentando la calidad superficial adecuada, sin presencia de indentación excesiva o esparcimiento de metal fundido.

Los valores de parámetros comunes en las probetas que $P= 3,5$ Bar, $T_a= 50$ ciclos (s), $T_s= 40$ ciclos (s), $T_{post}= 44$ ciclos (s), trabajados con un impulso y 5746, 6464 y 6823 A respectivamente.

Tabla N° 8. Evaluación del tipo de falla y medición del punto de soldadura en láminas de aluminio de 0,5 mm

INSPECCIÓN VISUAL				
Muestra	Calidad superficial	Resistencia al corte	Tipo de falla	D prom (mm)
I	Irregular	Fuerte	Desgarramiento	1,77
II	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	1,46
III	Irregular	Débil	Cizallamiento	1,5
IV	Irregular	Fuerte	Cizallamiento	1,76
V	Adecuada	Débil	Cizallamiento	1,52

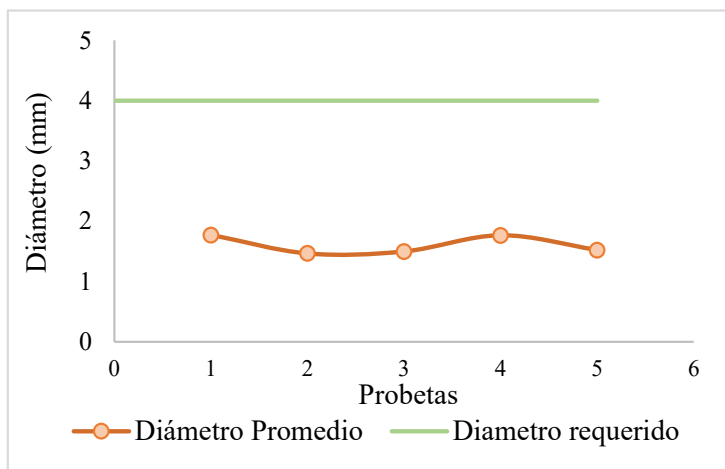


Figura N° 5. Gráfica del diámetro promedio obtenido en la evaluación láminas de aluminio de 0,5 mm

La gráfica que corresponde al desabotonado de probetas de aluminio no califica en el resultado del tamaño de soldadura, es inferior al valor requerido como establece de código ASME, tampoco califica por los linea-

mientos de la norma ISO 10447, donde se recomienda que el tipo de falla favorable debe ocurrir por desgarramiento.

Tabla N° 9. Evaluación del tipo de falla y medición del punto de soldadura en probetas de lámina galvanizadas de 1,5 mm y varillas de acero de Ø 4,5 mm

INSPECCIÓN VISUAL				
Muestra	Calidad superficial	Resistencia al corte	Tipo de falla	D prom (mm)
I	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	3,68
II	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	3,56
III	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	6,45
IV	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	4,10
V	Adecuada	Fuerte	Desgarramiento	4,275

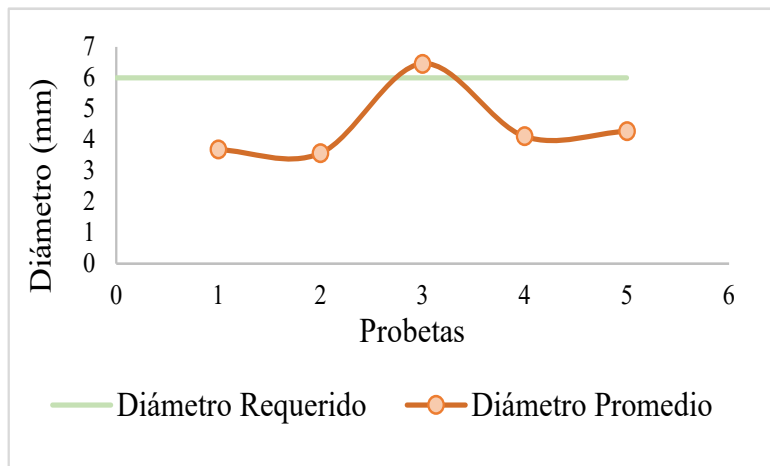


Figura N° 6. Gráfica del diámetro promedio obtenido en la evaluación lámina galvanizadas de 1,5 mm y varillas de acero de Ø 4,5 mm

La gráfica que corresponde al pelado de probetas lámina galvanizada con varilla de acero, el valor de indentación del parámetro III es el único que califica como acertado respecto al diámetro requerido, respecto al tipo de falla todas son favorables al presentarse desgarramiento recomendado por la norma ISO 10447.

C. Microestructura de botón de soldadura cumpliendo código ASME sección IX

A continuación, se muestran en la Figura N° 7, las macrografías obtenidas por lupa estereoscópica en magnificación de 10X como lo establece el código QW-196.1 para la evaluación macroscópica para soldadura por RSW.

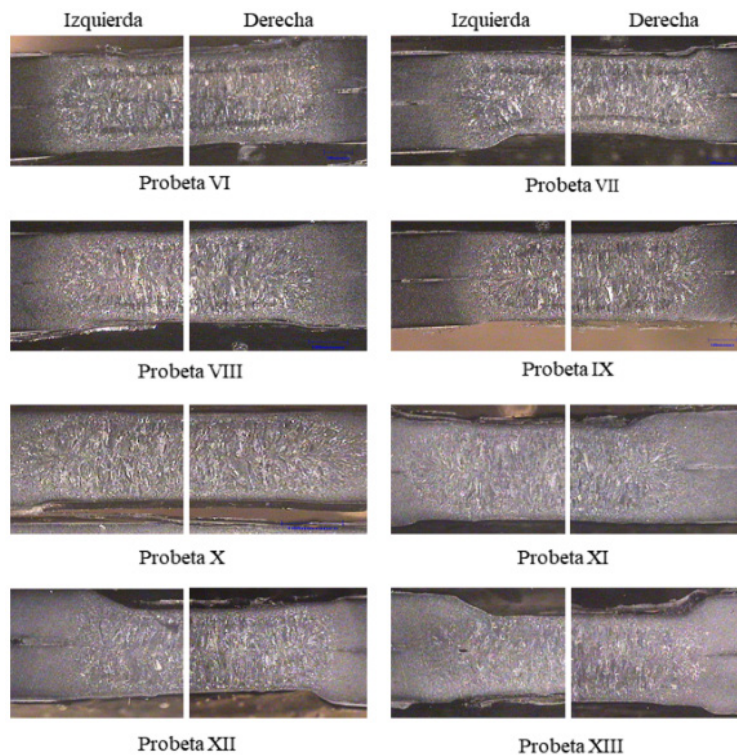


Figura N° 7. Sección transversal de los botones de soldadura a magnificación 10X

Las macrografías evaluadas presentan en su mayoría poros, fusión incompleta e inclusiones del propio material base.

La única soldadura aceptable fue las desarrolladas sobre probeta XI, siendo la sección transversal la que no tuvo presencia de poros o demás discontinuidades.

Para tener mayor discernimiento y evaluar con criterio las variables del proceso, se mostrarán a continuación, las micrografías que se evaluaron en un campo de acercamiento de 50X y 100X, para detallar con precisión las microestructuras.

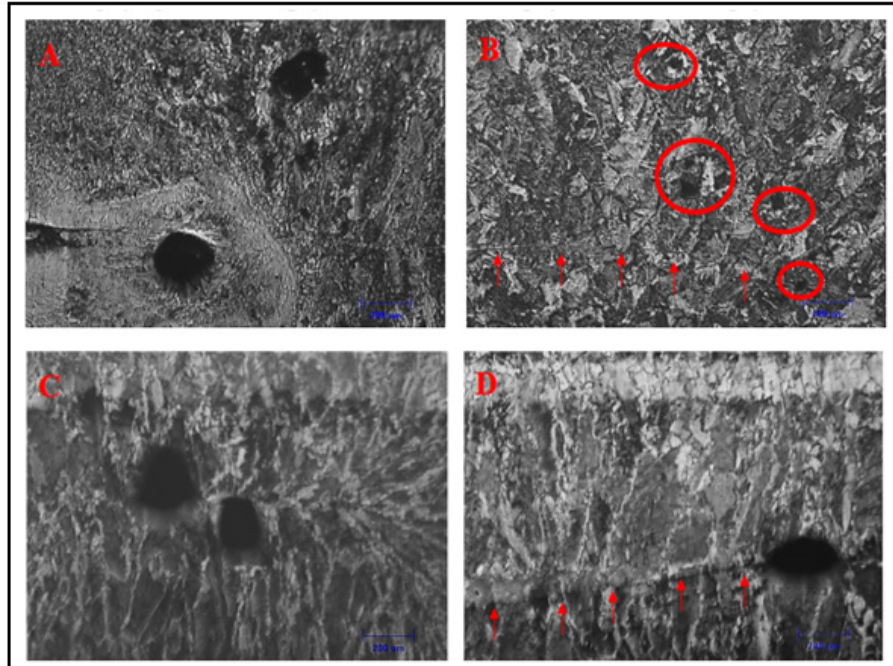


Figura N° 8. Micrografías en láminas galvanizadas en caliente. A) probeta I. Magnificación 50X. B) Probeta IV. Magnificación 100X. C-D) Probeta VI. Magnificación 50X.

Las variables de operación fueron $P=3$ Bar; $t_a=0.26$ s ciclos; $t_s=1$ s, $A=6823$ A, se 2 pulsos en intervalo de 2 ciclos, resultando en la micrografía A un poro en borde izquierdo muy cerca de la unión de las dos láminas lo que no es conveniente por estar ubicado muy próximo a un concentrador de esfuerzo, siendo a la vez este defecto propiamente un vacío concentrador de esfuerzo.

Las variables de operación para la micrografía B fueron $P=2$ Bar, $A=5746$ A, se disminuyó a un ciclo de operación y se mantuvo el mismo tiempo de aproximación de 0.26 s equivalentes a 13 ciclos. Para ambas micrografías A y B, la presencia de imperfecciones persiste.

Para micrografías B y D se muestran falta de fusión, defecto que previamente no se había manifestado, surgiendo entonces que la disminución de la presión a 2 Bar a las que se sometieron las tres muestras resulta que

no hubo presión suficiente, para que surja este fenómeno. Algo positivo de resaltar es que la aparición clara del botón de soldadura lo que nos permitirá realizar las mediciones y evaluar más detalladamente las muestras, el avance se debe al aumento de tiempo de aproximación (t_a) a 1 s (50 ciclos).

La probeta en condiciones óptimas se vincula a las micrografías referidas en la Figura N° 9. Se detallan las tomas en distintas áreas de la probeta que corresponde a la XI, se observa que es la muestra con los mejores resultados, al no encontrarse defectos dentro de la zona soldada, no se visualizan faltas de fusión, poros, ni grietas, se delimita perfectamente el botón de soldadura identificándose la ZF, ZAT. Los parámetros ideales resultantes fueron para Amperaje= 6465, $P=3.5$ Bar, $t_a=1$ s, $t_s=0.8$ s, $t_{post}=0.88$ s, con un ciclo de trabajo.

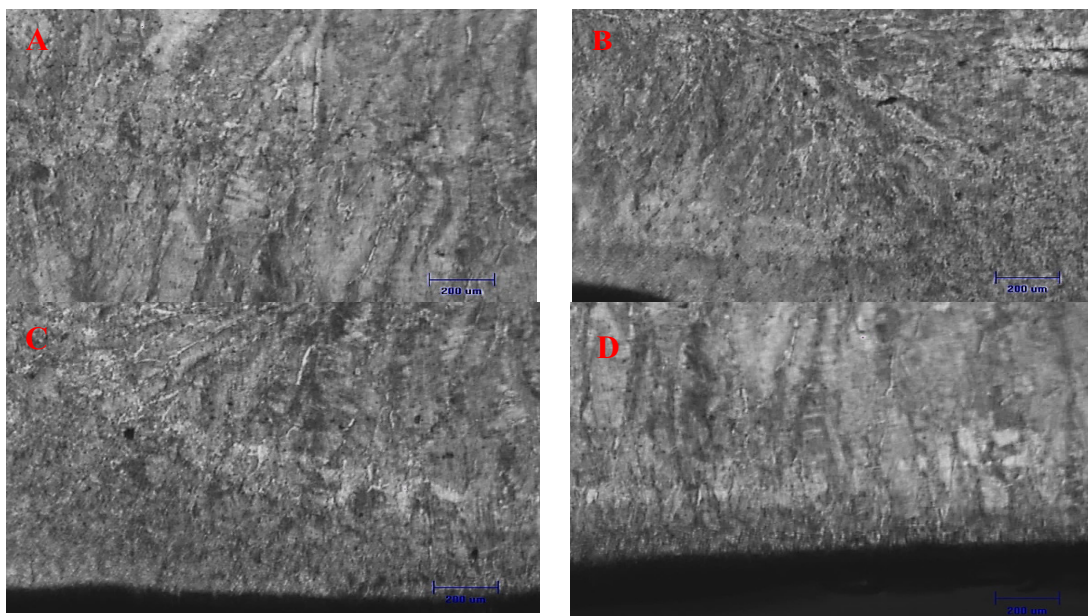


Figura N° 9. Micrografías de láminas galvanizadas en caliente, probeta XI en magnificación 50X. A) Centro de micrografía. B) Extremo derecho. C) Extremo izquierdo. D) Borde inferior.

La microestructura de la zona de fusión del botón de soldadura se detalla en la Figura N° 10, la zona de fusión resulta del material que ha sido fundido durante

la soldadura de resistencia por punto y solidificado posteriormente a una rápida velocidad de enfriamiento resultando ferrita alotrófica y ferrita Widmanstätten.

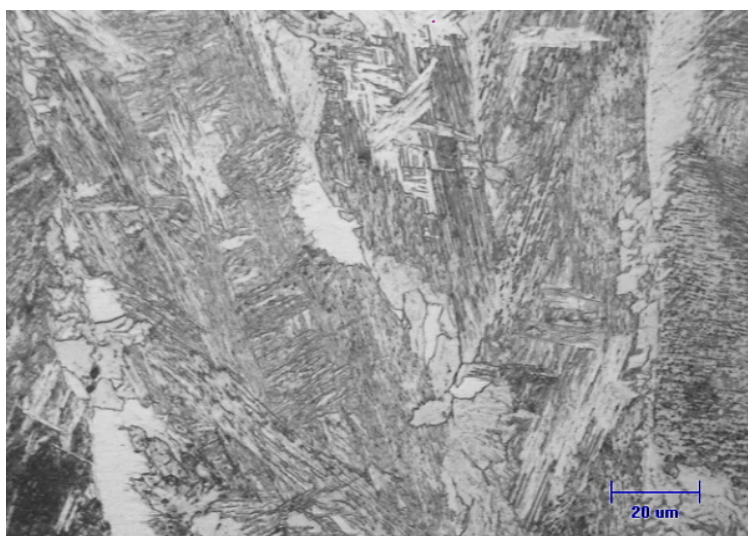


Figura N° 10. Zona de fusión, ferrita alotrófica y ferrita Widmanstätten, magnificación a 500X.

En la ZF ocurre una rápida velocidad de solidificación que se presenta en la zona de fusión en este proceso de soldadura, una vez fundido el núcleo, el enfriamiento interno con agua de los electrodos actúa como un gran disipador de calor y las láminas de acero también transfieren el calor hacia los lados, ocasionando altas velocidades de enfriamiento.

Los análisis macroscópicos para el ensayo de lámina galvanizada con varilla estriada de acero se muestran en la Figura N° 11, las macrografías obtenidas por lupa estereoscópica en magnificación de 10X como lo establece el código QW-196.1 para la evaluación macroscópica para soldadura por RSW en láminas galvanizadas de 1,5mm de espesor junto con una varilla de acero de 4,5mm de diámetro. No convienen las probetas II, IV y V al presentar poros en la zona fundida. Para tener me-

por criterio de evaluación se realizan inspecciones por mejor apreciación. (Ver Figura N°11).
microscopía óptica en magnificación de 50X para tener

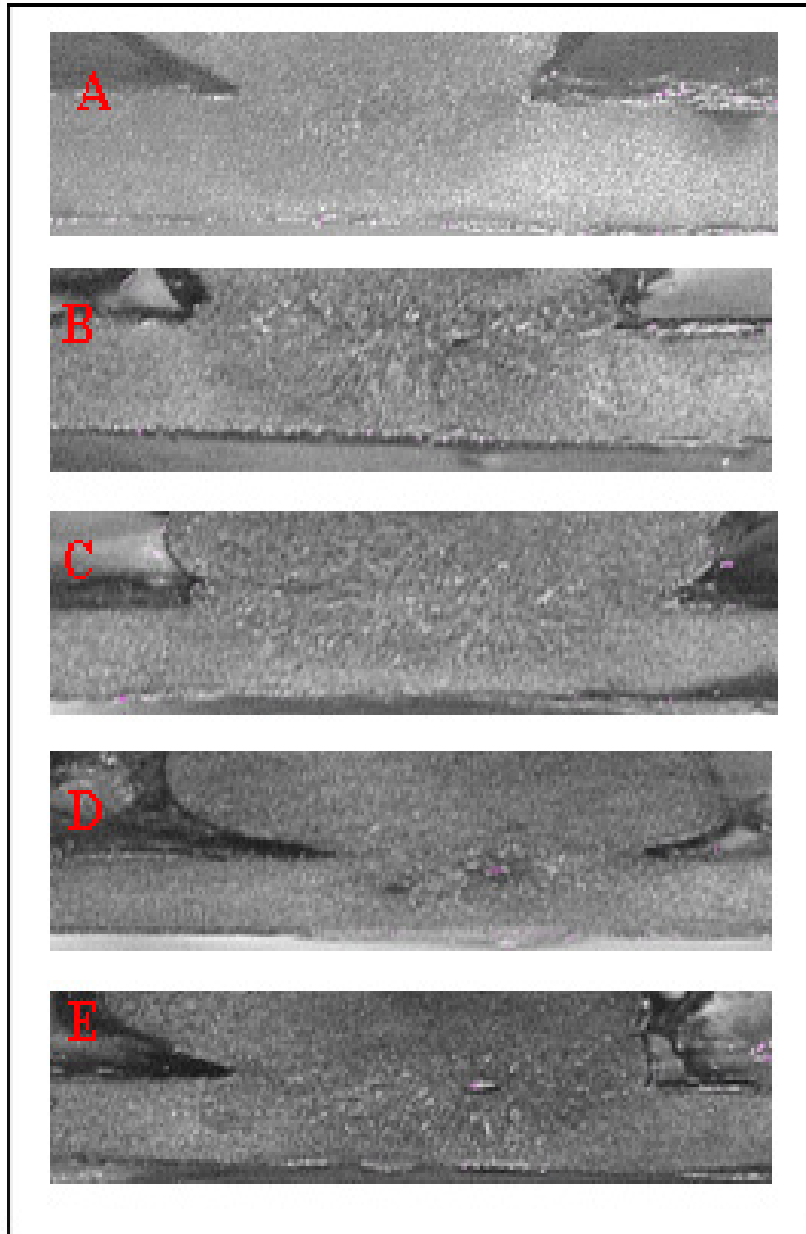


Figura N° 11. Macrografías de la soldadura por puntos en lámina galvanizada con varilla de acero estriada. Magnificación 10X. A) Probeta I. B) Probeta II. C) Probeta III. D) Probeta IV. E) Probeta V

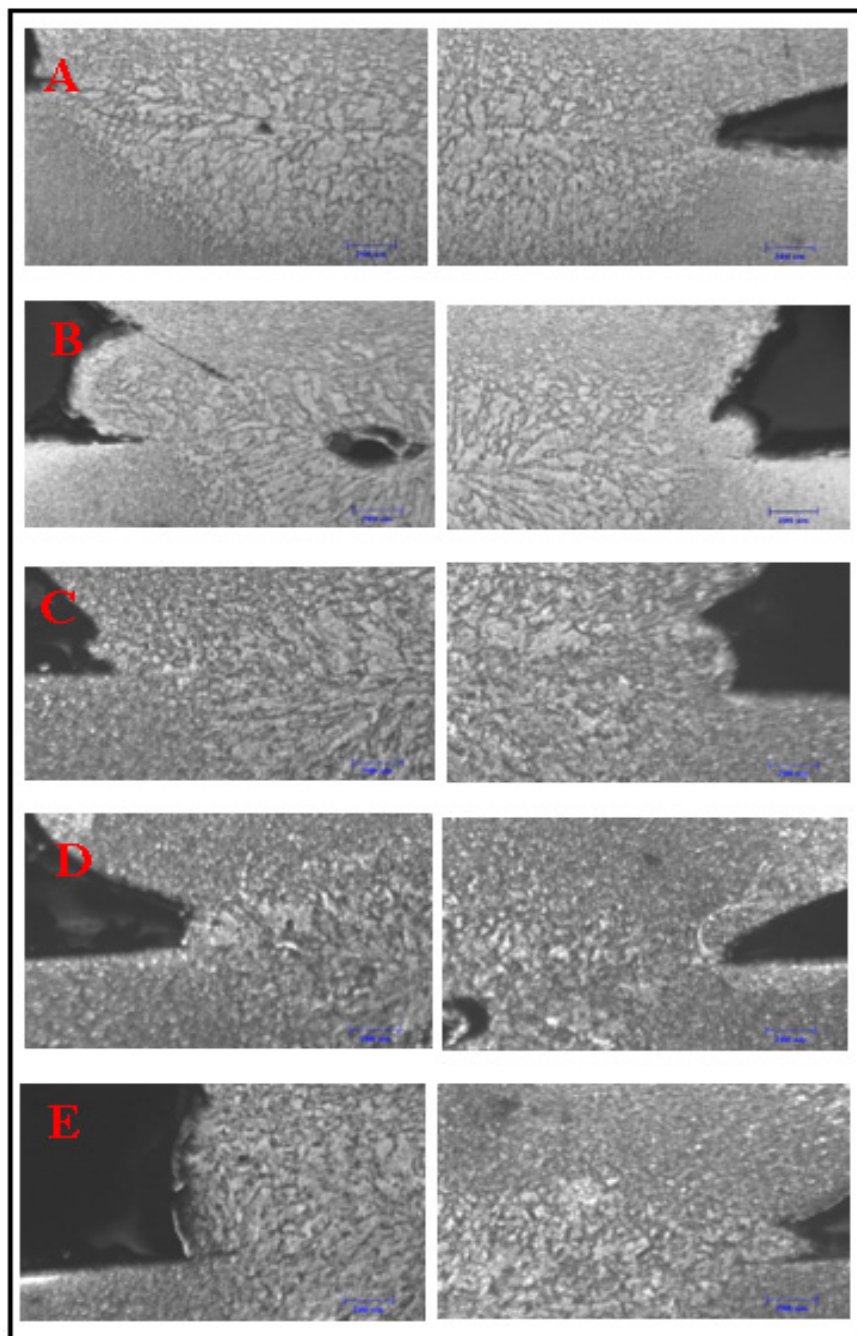


Figura N° 12. Micrografías de láminas galvanizadas en caliente soldada con varilla de acero estirada. Magnificación 50X. A) Probeta I. B) Probeta II. C) Probeta III. D) Probeta IV. E) Probeta V.

La probeta que resulta con mejor comportamiento es la III, el punto de soldadura es equidistante en la zona que abarca la lámina y varilla, no se muestran poros o falta de fusión que intervengan en la aceptación de los parámetros.

IV. CONCLUSIONES

El ensayo no destructivo de cincel arroja como satisfactorios los resultados en todas las probetas analizadas para el proceso lámina - lámina galvanizada y para la

unión de materiales disímiles que corresponde al proceso lámina - varilla. Las probetas de aluminio evaluadas no califican, factores como la clase del electrodo, el diámetro de la cara activa del electrodo pudieron ser factores que no favoreció a que se formara la huella promedio correcta y como consecuencia, no se crea la fusión acorde al espesor de las láminas.

Las soldaduras presentan una buena zona de fusión, establecido mediante el ensayo de desabotonado y la medición de tamaño del botón. Cuando se emplea la

modalidad de soldadura suave, en el interior de la junta se observaron faltas de fusión, lo que tuvo un impacto negativo en la calidad de la soldadura, las fracturas se presentaron por escisión frágil y cizallamiento dúctil. En el modo de soldadura dura, las discontinuidades presentes fueron la proyección del metal, observándose el esparcimiento desde el interior de la junta y la indentación excesiva del material soldado, además ocasiona el deterioro y contaminación del área de contacto del electrodo.

En el análisis macroestructural de los puntos de soldadura, presentados en la prueba de lámina-lámina galvanizada por inmersión en caliente se aprecia el metal base sin afectar, la zona afectada térmicamente (ZAT) y la zona de fusión o botón de soldadura, en el cual se percibe una microestructura de granos columnares orientados por la trayectoria de solidificación durante el enfriamiento. La formación de cavidades en el acero se debe al sobrecalentamiento producido en la interfase de las láminas, y a la presencia de elementos aleantes volátiles que se evaporan cuando ocurre el calentamiento, quedando atrapados en la zona de fusión en forma de poros. Para aceros de bajo carbono se debe optar por trabajar con un solo pulso de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Morales-Sánchez, G.; Collazo A.; Doval-Gandoy, J. (2021). Influence of the Process Parameters on the Quality and Efficiency of the Resistance Spot Welding Process of Advanced High-Strength Complex-Phase Steels. *Universidad de Vigo, Metals* 2021,11(10), 1545.
- [2] BEARCAT, S.A (2022). Tipos de Soldadura por Resistencia. Barcelona – España. Consultado en página web: <https://bearcat.es/2022/02/23/tipos-de-soldadura-por-resistencia/>
- [3] Miguel Delgado (2014). Soldabilidad de aceros IF y HSLA galvanizados para aplicaciones automotrices. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México.
- [4] José Andrade (2018). Soldadura de electropunto en láminas de acero AISI 1015 galvanizadas por inmersión en caliente. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Barquisimeto – Venezuela.
- [5] Williams Mavares, Emmanuel Oliveros (2009). Evaluación de la influencia de la fuerza aplicada a los electrodos en la calidad de la soldadura por resistencia eléctrica. Universidad de Carabobo. Escuela de Ingeniería Mecánica. Barquisimeto – Venezuela.
- [6] Manual De Soldadura Por Resistencia. Junta de León y Castilla. Segunda Edición. Valladolid - España.
- [7] Uijl, N.J., den, Smith, S., Moolevliet, T., Goos, C., Aa, EM van der & Veldt, T van der (2008). Failure modes of resistance spot welded advanced high strength steels. In W Zhang & N Scotchmer (Eds.), *Proceedings 5th International Seminar on Advances in Resistance Welding*, Toronto - Canada.
- [8] José Guallichico (2008). Análisis, implementación y validación de programas stepper en equipos de soldadura por resistencia críticos de la celda aveo de la planta de soldadura de gm-obb s.a. utilizando normas corporativas. Escuela Politécnica Nacional. Quito - Ecuador.
- [9] Niurka Peinado (2010). Calificación del proceso de soldadura por resistencia eléctrica de una línea de ensamblaje de la planta Toyota de Venezuela. Universidad de Oriente. Departamento de Mecánica. Puerto la Cruz – Venezuela.
- [10] ASME BPVC.IX-2023. ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code. SECTION IX Welding, Brazing, and Fusing Qualifications. Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers and Welding, Brazing, and Fusing Operators. USA- 2023.
- [11] Arias, F. (2012). El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica. Editorial Episteme, 6ta edición, Caracas-Venezuela.
- [12] ISO 5821:2009. Resistance welding spot welding electrode caps. Switzerland - 2009.
- [13] ASM Handbook. Welding, Brazing, and Soldering. PUBLISHED IN 1993 AS VOLUME 6 OF
- [14] Euganea Machine Elettromeccaniche. Consultado en página web: <https://www.eme-weld.it/>
- [15] ISO 10447:2022. Resistance welding - Testing of welds - Peel and chisel testing of resistance spot and projection welds. Switzerland - 2022.

PREDICCIÓN DE MEZCLAS DE MENAS DE HIERRO Y SU COMPORTAMIENTO EN UN PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA EN LECHO FLUIDIZADO

Núñez Ernesto, Ramírez Luis y Rivas Ruth
{enunez, ramirezl, rivas}@orinoco-iron.com
Orinoco Iron S.C.S.

Resumen: Las menas de hierro presentan diferentes mineralogías y textura, y son clasificadas en menas friables y menas duras, debido a esta diferencia, ellas pueden tener diferentes comportamientos en un proceso de reducción directa en lecho fluidizado, de allí la importancia de conocer sus proporciones en una mezcla y su comportamiento en el proceso. En el presente trabajo se desarrollaron dos modelos estadísticos para predecir la mezcla de menas de hierro y su comportamiento en la reducción directa en lecho fluidizado. La data seleccionada fue la de caracterizaciones de lotes de mezclas de menas de hierro de la mina los Barrancos de Ferrominera Orinoco en Venezuela y datos del proceso FINMET de Orinoco Iron S.C.S. La metodología aplicada fue la inferencia estadística a través de correlaciones lineales, considerando la prueba de hipótesis de la regresión múltiple. Las ecuaciones obtenidas para los dos modelos fueron estadísticamente significativas.

Palabras Clave: Mineral de hierro, reducción directa, lecho fluidizado, modelos estadísticos

EFFECT OF LOADING PATTERNS ON OBTAINING GREY IRON USING ASTM A - 367 STANDARD IN CVG VENALUM

Abstract: The following study was conducted at CVG VENALUM. The objective was to study the effect of loading patterns on the production of gray cast iron using ASTM A-367. To achieve this objective, it was necessary to create two wedge-shaped molds (a metal-to-metal mold and a metal-to-carbon mold) to study the influence of cooling rates. Loading patterns for 100% steel tips, 100% thimbles, and mixed (50% tips and 50% thimbles) were evaluated using wedge-shaped molds. Optical microscopy and metallographic analysis of the gray cast iron samples obtained from the loading patterns were used. The study has an experimental design based on the observation of gray cast iron behavior by analyzing metallurgical evaluations. The sample population was represented by three gray cast iron samples, each corresponding to a loading pattern. The metallographic study revealed the presence of a microstructure formed by dendrites of austenite transformed into pearlite, with sheets of type A, E and D graphite.

Keywords: Analysis, Gray cast iron, loading pattern.



I. INTRODUCCIÓN

Las menas de hierro son rocas o material natural compuesto de un mineral o minerales de valor económico que puede extraerse con un beneficio razonable [1]. Esta definición puede ser aplicada también como un término económico para referirse a depósitos que contienen hierro y productos que han sido, están siendo o podría esperarse que sean explotados económicamente por su contenido en hierro [2].

Los tres tipos de minerales hierro más comunes son: magnetita, hematita y goethita, que en conjunto representan aproximadamente 99% del contenido en los minerales de las menas de hierro comercializadas en el mundo [2]. La composición mineralógica de las menas de hierro define su composición química y propiedades físicas como su textura y color. Estas características se correlacionan entre ellas y pueden permitir predecir su comportamiento en un proceso metalúrgico como lo es la reducción directa en lecho fluidizado. Una gran parte de los lotes de menas de hierro comercializados a nivel mundial y alimentados a diferentes procesos metalúrgicos son mezclas de goethita marrón dura y goethita ocre amarilla, con hematitas.

Las menas de hierro se pueden clasificar, de acuerdo a su textura, en menas duras y menas friables. Esta clasificación es importante para un proceso de reducción directa en lecho fluidizado, porque de acuerdo a la friabilidad o dureza de la mena se degradaran físicamente más o menos las partículas, modificando su tamaño, lo que puede afectar las condiciones de fluidización y reducción del material. Con datos de caracterización de mezclas de menas y datos de proceso pueden ser desarrollados modelos matemáticos predictivos para determinar los porcentajes de menas duras y friables y posteriormente su comportamiento en el lecho fluidizado en condiciones de reducción.

Para el desarrollo de esta investigación se aplicaron correlaciones lineales y se consideró una data de caracterizaciones de lotes de mezclas de menas de hierro proveniente de la mina los Barrancos de Ferrominera Orinoco, ubicada en el estado Bolívar, Venezuela, y datos del proceso FINMET con el que opera Orinoco Iron S.C.S. El trabajo incluye un desarrollo donde se exponen aspectos teóricos, la metodológica aplicada, los resultados obtenidos y por último las conclusiones.

II. DESARROLLO

A. Menas de mineral de hierro

Las menas de mineral de hierro son rocas que están constituidas por uno o más minerales que definen su composición química y propiedades físicas como su

textura y color.

La clasificación de las menas de hierro está basada en dos grupos principales: minerales duros o costras y minerales blandos o friables, conocidos como finos; estas son divididas en diferentes subtipos, de acuerdo a sus características químicas y físicas y textura. Las especies blandas son llamados finos y su aspecto es como arena suelta, ellas son moderadamente hidratadas con alta porosidad. Debido a su forma y textura estas menas son llamadas finos laminados o en microplacas. Las especies duras son llamadas costras y se ubican en las áreas superficiales del depósito, cubriendo los bolsones de finos. Se originan de los procesos de disolución e hidratación [3].

Ferrominera Orinoco las clasifica de la siguiente forma [3]:

Menas friables: Finos negros (hematítica), Finos marrones (hematítica con incrustaciones de goethita ocre amarilla) y goethita ocre amarilla (limonita).

Menas duras: Costra masiva (hematítica-goethítica), Costra hematítica, Costra goethítica ocre y Costra goethítica vitriosa.

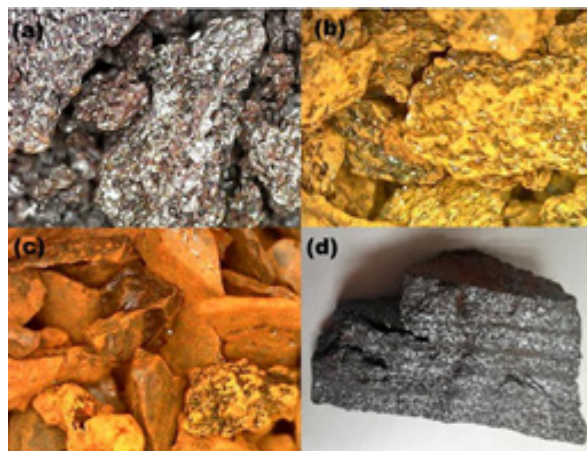


Figura 1: Menas de Hierro. (a) Finos negros, (b) Costra goethítica ocre, (c) Costra goethítica vitriosa, (d) Costra Hematítica.

Es de esperarse que en un proceso de reducción directa en lecho fluidizado estas menas de hierro tengan diferentes comportamientos debido a su textura, mineralogía y composición química. Siendo las menas friables las que tienden a un mayor desgaste por fricción (attrition), las menas goethíticas las de mayor reducibilidad y las menas hematíticas las que tienden a adherirse (sticking).

La medición de la pérdida por calcinación (PPC) es una técnica ampliamente utilizada en la industria del

mineral de hierro. La pérdida por calcinación es la suma de las contribuciones de la pérdida de masa de compuestos volátiles, vapor de agua, dióxido de carbono y sulfuros (debido a la descomposición de la goethita y materiales carbonosos), y la ganancia de masa debido a la oxidación [Fe(II) a Fe₂O₃] [4].

B.Reducción directa en lecho fluidizado

La fluidización es la operación mediante la cual las partículas sólidas se transforman en un estado fluido por suspensión en un gas o líquido [5]. La tecnología de lecho fluidizado ofrece condiciones ideales para el procesamiento de material de grano fino y permite la reducción de minerales finos sin previa peletización [6].

El proceso FINMET es un proceso de reducción directa que utiliza reactores de lecho fluidizado para generar las reacciones químicas entre el mineral de hierro y el gas reductor. En estos reactores, dispuestos en cascada, la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas, con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura evitando la formación de zonas calientes y a la vez fa-

cilita el contacto gas – sólido. El reactor se trata de un depósito cilíndrico vertical que contiene partículas sólidas finas. La corriente del gas reductor se introduce en los reactores a una velocidad tal que los sólidos flotan en la corriente del fluido sin salir del sistema. En estas condiciones, el lecho de partículas se comporta como un líquido en ebullición que tiende a igualar la composición de la mezcla de reacción y la temperatura a lo largo del lecho. Las operaciones normales consisten en un régimen de burbujeo, desplazándose el gas a través del reactor de dos maneras: como “burbujas” que contienen pocas partículas de sólidos y se mueven con más rapidez que la velocidad promedio y como base continua “densa” o de emulsión” en la que la concentración de partículas es alta [7].

Para un proceso de reducción directa en lecho fluidizado se puede predecir el contenido de hierro metálico en el mineral reducido conociendo la mezcla de menas de hierro alimentada y las condiciones de proceso. Una de las herramientas que puede ser aplicada es la inferencia estadística para la obtención de un modelo matemático.

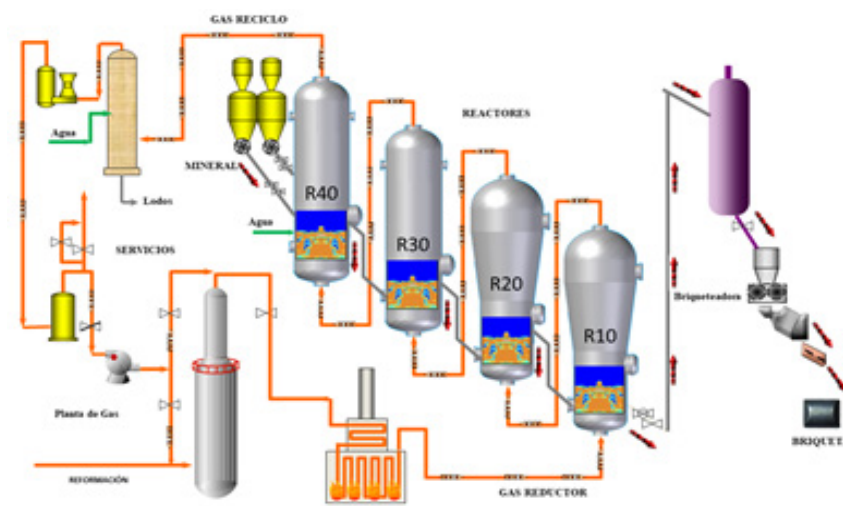


Figura 2: Proceso de reducción directa en lecho fluidizado - FINMET

C.Métodos Estadísticos para la Evaluación de Procesos Industriales

En los procesos industriales, como lo es la reducción directa de menas de hierro en lecho fluidizado, el resultado obtenido de una variable puede estar correlacionado a una o más variables. En muchas circunstancias la correlación de variables para una condición de proceso es bien conocida y entendida. Pero hay otras clases de correlaciones que son menos claras. En estos casos las variables en cuestión pueden ser correlacionadas sola-

mente por métodos estadísticos que las relacionan entre sí. A diferencia de una correlación funcional o casual, una asociación estadística entre dos variables describe solamente la naturaleza general de la correlación. Esta no es una correspondencia de uno a uno entre los valores de las dos variables. Más bien, cada valor de una variable está relacionado a una distribución de valores de la otra. Cada circunstancia requiere nuevas estadísticas para describir la naturaleza y la extensión de la asociación entre las variables [8].

Los métodos estadísticos se utilizan para analizar datos de procesos industriales; el objetivo de esto es tener una mejor orientación respecto, de cuáles cambios se deben realizar en el proceso para mejorar su calidad, estos tienen que ver con la variabilidad y en cada caso la variabilidad que se estudia se encuentra en los datos científicos para un experimento o de datos de laboratorio y de los sistemas de control de una Planta. Estos permiten efectuar los análisis de datos obtenidos de los procesos industriales, lo cual refleja la verdadera naturaleza de la ciencia que conocemos como estadística inferencial, a saber, el uso de técnicas que, al permitirnos obtener conclusiones (o inferencias) sobre el sistema científico, nos permiten ir más allá de sólo reportar datos. La información se colecta en forma de muestras o conjuntos de observaciones. Las muestras se reúnen a partir de poblaciones, que son conjuntos de todos los individuos o elementos individuales de un tipo específico [9].

Uno de los métodos de inferencia estadística es el análisis de regresión, que se refiere a encontrar la mejor relación entre “Y” y “X” cuantificando la fuerza de esa relación, y empleando métodos que permitan predecir los valores de la respuesta dados los valores del regresor “X”. En muchas aplicaciones habrá más de un regresor, es decir, más de una variable independiente que ayude a explicar a “Y” [9]. El análisis resultante se denomina regresión múltiple; en tanto que el análisis del caso con un solo regresor recibe el nombre de regresión simple.

III. MÉTODOS Y MATERIALES

Para la predicción de mezclas de menas de hierro y su comportamiento en la reducción directa en lecho fluidizado se desarrollaron dos modelos matemáticos a través de correlaciones lineales.

Modelo 1: Modelo de predicción de mezclas de menas de hierro (% Costras):

Se aplicó la inferencia estadística a una base de datos de caracterización de lotes de menas de hierro provenientes de Ferrominera del Orinoco y procesados en Orinoco Iron, tomando como variable dependiente la proporción de costras o menas duras y como variable independiente la PPC, debido a que es de esperarse una correlación lineal entre estas variables, ya que las costras poseen altos contenidos de goethita y en el valor de la PPC se incluye la pérdida de masa por la descomposición de la goethita.

Modelo 2: Modelo de predicción del comportamiento de la mezcla en la reducción directa en lecho fluidizado (% Fe Metálico):

Se aplicó la misma técnica del modelo anterior, tomando como variable dependiente el contenido de hierro metálico en el mineral reducido (% Fe Metálico) y como variables independientes la proporción de costras en la mezcla de menas de hierro alimentada a reactores y la temperatura del lecho en el reactor inferior (R10), considerando que la selección de las muestras se realizó en un periodo de tiempo de estabilidad operativa y con pocas variaciones de variables de proceso, asumiéndose como variables constantes o de poca variación la presión, el poder reductor del gas, el tiempo de residencia, la temperatura en el reactor superior (R40) y la alimentación del mineral al circuito de reactores. Es importante aclarar que debido a la disposición en cascada de los reactores, en el proceso de reducción directa en lecho fluidizado, las temperaturas y presiones de los reactores superiores son dependientes de la temperatura y presión del reactor inferior, a excepción del R40 que se le inyecta agua para el control de temperatura.

A. Población y Muestra

La población de estudio, para la predicción de mezclas de menas de hierro, fueron los lotes de menas de hierro provenientes de la mina Los Barrancos de Ferrominera del Orinoco y procesados en Orinoco Iron, las muestras seleccionadas, de forma aleatoria, fueron lotes de menas de hierro, homogenizados y caracterizados, recibidos en Orinoco Iron entre marzo 2022 y julio 2023. Para predecir el comportamiento de una mezcla de menas de hierro en un proceso de reducción directa en lecho fluidizado, se tomó como población las muestras de mineral alimentado al tren 3 (M5) y condiciones de proceso en la campaña 33, seleccionando una muestra aleatoria que correspondió al período comprendido entre 09-06-2020 hasta el 19-06-2020.

B. Tamaño de la muestra

Modelo 1: Modelo de predicción de mezclas de menas de hierro (% Costras):

El nivel de confianza de este estudio fue del 95% ($\alpha = 0,05$) con un error máximo admisible (e) de 1,23%, considerando que la base de datos es obtenida en laboratorio. Se calculó una varianza (σ^2) para 30 datos de la población considerada, utilizando el software estadístico SPSS versión 2010, obteniéndose un valor de 11,832. El valor de $z\alpha/2$ (constante que depende del nivel de confianza) se calculó utilizando la tabla A.3 de Walpole [9], encontrándose un valor de 1,96.

Considerando a n como el número de muestra y que de acuerdo al teorema 9.2 [9]:

$$n = [(z\alpha/2)^2 \sigma^2] / e^2 \quad (1)$$

Sustituyendo en la ecuación 1:

$$n = [(1,96)^2 11,832]/(1,23)^2 = 30$$

(El tamaño de la muestra es de al menos 30 valores).

Modelo 2: Modelo de predicción del comportamiento de la mezcla en la reducción directa en lecho fluidizado (% Fe Metálico):

El nivel de confianza de este estudio fue del 90% ($\alpha = 0,10$) con un error máximo admisible (ϵ) de 0,79%, considerando que la base de datos es de laboratorio y de proceso. Se calculó una varianza (σ^2) para 30 datos de la población considerada, utilizando el software estadístico SPSS versión 2010, obteniéndose un valor de 7,014. El valor de $\alpha/2$ se calculó utilizando la tabla A.3 de Walpole [9], encontrándose un valor de 1,65.

Sustituyendo en la ecuación 1:

$$n = [(1,65)^2 7,014]/(0,79)^2 = 31$$

(El tamaño de la muestra es de al menos 31 valores).

C.Desarrollo de los modelos matemático para la predicción de mezclas de menas de hierro y la predicción de comportamiento de la mezcla en la reducción directa en lecho fluidizado.

Para los dos modelos se identificaron las variables más influyentes, se verificó que los datos presentaran una distribución normal, se analizaron las interacciones entre las variables para determinar que se acoplan a una función de regresión y se estructuró la propuesta tomando en consideración las variables cuantitativas y

estadísticamente significativas, lo que permitió realizar la regresión adecuada a las variables con el software estadístico SPSS versión 2010, obteniéndose así el modelo matemático.

Para el modelo 1 se seleccionaron 37 valores de las 77 caracterizaciones realizadas a lotes de menas de hierro y para el modelo 2 se seleccionaron 35 valores de los 58 datos de laboratorio y de proceso de la corrida 33 del tren 3. La propuesta de los modelos se presentó mediante las ecuaciones matemáticas correspondientes con su respectivo error máximo admisible.

IV.RESULTADOS

A continuación se presentan los análisis de los resultados estadísticos obtenidos y los modelos matemáticos desarrollados.

A.Modelo 1: Modelo de predicción de mezclas de menas de hierro (% Costras)

Tomando en cuenta lo expuesto teóricamente, las mezclas de menas de hierro alimentadas al proceso de reducción directa en lecho fluidizado FINMET, están constituidas de menas duras o costras y de menas blandas o friables. Para la predicción de los porcentajes en la mezcla se puede estimar el porcentaje de costras considerando su correlación con la PPC, ya que esta incluye la pérdida de masa por la descomposición de la goethita, que es el principal mineral ferroso presente en la mayoría de estas menas. Al correlacionar el porcentaje de Costras en función del porcentaje de PPC se obtuvieron los siguientes parámetros estadísticos:

TABLA I
ANOVA DEL MODELO DE REGRESIÓN (MODELO 1)

Modelo	Suma de Cuadrados	k	Media Cuadrática	F	P
Regresión	262,865	1	262,865	87,609	0,000
Residual	105,014	35	3,000		
Total	367,879	36			

TABLA II
BONDAD DEL AJUSTE DEL MODELO DE REGRESIÓN – COEFICIENTE DE REGRESIÓN (MODELO 1)

Modelo	R	R ²	R ² corregida	Error típ. de la estimación
1	0,845	0,715	0,706	1,73217

TABLA III
COEFICIENTES Y SIGNIFICANCIA DEL MODELO DE REGRESIÓN (MODELO 1)

Modelo	Coeficientes no Estandarizados		Coef.	t	P
	B	Error típ.	Tipificados Beta		
Constante	50,710	2,998		16,971	0,000
PPC	5,731	0,612	0,0845	9,360	0,000
Total	367,879	36			

Para confirmar si existe una relación lineal entre el porcentaje de costras y la PPC se aplicó la prueba de regresión de la significancia obteniéndose:

$$F(0,05;1;35) = 4,125 \quad (\alpha = 0,05; k = 1; n-k-1 = 35)$$

(Tabla razón F - Fisher-Snedecor [10])

$$F(\text{modelo}) = 87,609 \quad (\text{Tabla I})$$

al comparar:

$$F(\text{modelo}) > F(0,05; 1; 35)$$

Por lo que se descarta la hipótesis nula y se concluye que al menos la PPC tiene un coeficiente de regresión diferente de cero, otra forma de evaluar la significancia estadística de la razón F, es juzgándola por su valor-P que de acuerdo a la Tabla III es de 0,000; inferior al valor α de 0,05. La bondad del ajuste del modelo se determina a partir del R², que de acuerdo a la Tabla II es de 0,715, este valor se puede considerar alto.

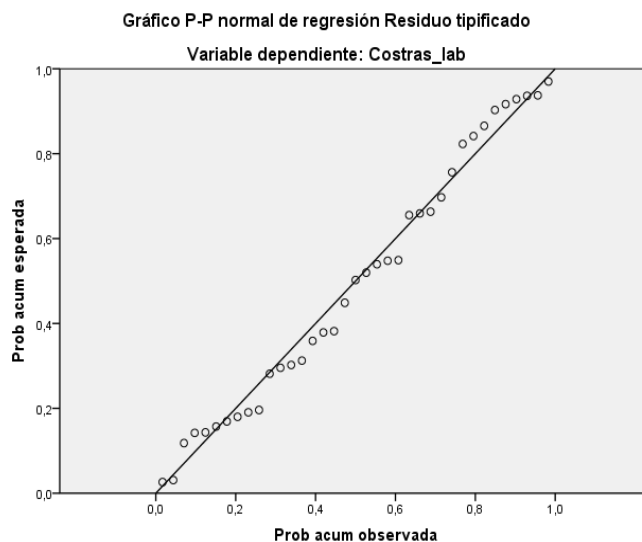


Figura 3: P-P Normal de Regresión del Residuo Tipificado para el Modelo 1

La bondad del modelo se puede medir, además de su significancia y valor del R², por la dispersión de los errores de predicción, que se puede observar en la Figura 3 que sigue una distribución uniforme. Cuanto menos disperso sean los residuos, mejor será la bondad del ajuste. Por lo que estadísticamente puede ser aplicado el modelo matemático desarrollado para predecir el porcentaje de costras en las mezclas de menas de hierro.

Ecuación del Modelo 1:

$$\%Costra = 50,710 + 5,731(\%PPC) \quad (2)$$

$$\quad \quad \quad +/_ 1,23$$

B. Modelo para la predicción del comportamiento de la mezcla de menas de hierro en la reducción directa en lecho fluidizado (% Fe Metálico)

Para un proceso de reducción directa en lecho fluidizado las variables más importantes del proceso para alcanzar un nivel óptimo de hierro metálico o de metalización son la temperatura del lecho en el reactor inferior (R10), la presión, el poder reductor del gas, el tiempo de residencia, la temperatura en el reactor superior (R40) y la alimentación del mineral al circuito de reactores. La operación de la planta se lleva a cabo con poca variabilidad de estos parámetros realizando ajustes principalmente con las temperaturas de reducción y la alimentación del mineral. Para facilitar el desarrollo

de un modelo matemático aplicado a este tipo de proceso es conveniente seleccionar períodos de tiempo de estabilidad operativa.

Para el periodo seleccionado las condiciones de proceso fueron las mostradas en la tabla IV.

TABLA IV
VARIABLES DE PROCESO CONSIDERADAS PARA MODELO 2

Variable de Proceso	Valores
Mezcla de menas alimentadas a reactores (%Costras)	70 - 88
Alimentación del mineral al circuito de reactores	75 t/h
Temperatura en el reactor superior (R40)	450°C
Tiempo de residencia en reactor inferior (R10)	30,24 min
Presión reactor inferior (R10)	9 bar
Temperatura del lecho en el reactor inferior (R10)	756 - 777°C
Poder reductor del gas (H ₂ +CO)/(H ₂ O+CO ₂)	12

Para ello se evaluaron las significancias de estas variables en un ANOVA preliminar encontrándose que para el periodo evaluado solo las variables: mezcla de menas alimentadas a reactores (%Costras) y temperatura del lecho en el reactor inferior (R10), presentaron valores de P menores al valor de α considerado, esto debido a la poca variabilidad de los otros parámetros.

En la Tabla IV se indican los valores promedios de los parámetros con poca variabilidad con la finalidad de indicar las condiciones de proceso que aplican para el modelo desarrollado. Al correlacionar el porcentaje de hierro metálico en función del porcentaje de costras y la temperatura del reactor inferior (R10) se obtuvieron los siguientes parámetros estadísticos:

TABLA V
VARIABLES DE PROCESO CONSIDERADAS PARA MODELO 2

Modelo	Suma de Cuadrados	k	Media Cuadrática	F	P
Regresión	91,027	1	45,513	12,957	0,000
Residual	115,921	33	3,513		
Total	206,948	35			

k= Grados de Libertad, F= Fisher-Snedecor, P= Significancia

TABLA VI
RESUMEN DEL MODELO DE REGRESIÓN – COEFICIENTE DE REGRESIÓN (MODELO 2)

Modelo	R	R ²	R ² corregida	Error típ. de la estimación
1	0,663	0,440	0,406	1,87424

TABLA VII
COEFICIENTES Y SIGNIFICANCIA DEL MODELO DE REGRESIÓN (MODELO 2)

Modelo	Coeficientes no Estandarizados		Coef. Tipificados	t	P
	B	Error típ.			
Constante	-201,673	60,028	Beta	-3,360	0,002
Costras_M5	0,220	0,121	0,241	1,816	0,078
Temp_Lecho_R10	0,347	0,080	0,575	4,338	0,000

Para confirmar si existe una relación lineal entre el porcentaje de hierro metálico con el porcentaje de costras y la temperatura del reactor inferior (R10) se aplicó la prueba de regresión de la significancia obteniéndose:

$F(0,10;2;33) = 2,474$ ($\alpha = 0,10$; $k = 2$; $n-k-1 = 33$) (Tabla razón F - Fisher-Snedecor [10])
 $F(\text{modelo}) = 12,957$ (Tabla V)
al comparar:

$$F(\text{modelo}) > F(0,10; 2; 33)$$

Por lo que se descarta la hipótesis nula y se concluye que al menos el porcentaje de costras y la temperatura del reactor inferior (R10) tienen un coeficiente de regresión diferente de cero, otra forma de evaluar la significancia estadística de la razón F, es juzgándola por

su valor-P que de acuerdo a la Tabla VII son de 0,078 y 0,000 respectivamente, inferiores al valor α de 0,10. La bondad del ajuste del modelo se determina a partir del R2, que de acuerdo a la Tabla VI es de 0,44; este valor se puede considerar representativo para datos tomados de un proceso industrial.

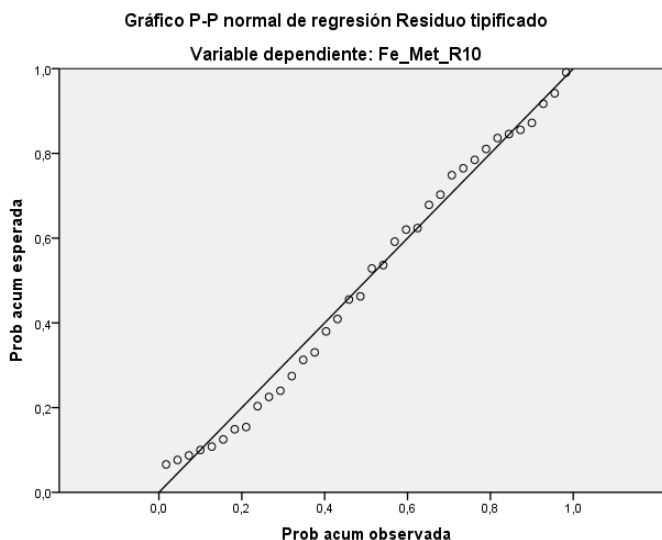


Figura 4: P-P Normal de Regresión del Residuo Tipificado para el Modelo 2

La bondad del modelo se puede medir, además de su significancia y valor del R2, por la dispersión de los errores de predicción, que se puede observar en la Figura 4 que sigue una distribución uniforme. Cuanto menos disperso sean los residuos, mejor será la bondad del ajuste. Por lo que estadísticamente puede ser aplicado el modelo matemático desarrollado para predecir el comportamiento de la mezcla de menas de hierro en la reducción directa en lecho fluidizado (% Fe Metálico).

Ecuación del Modelo:

$$\% FeMet = -201,673 + 0,22(\%C) + 0,347 (TR10) \quad (3)$$

$\pm 0,79$

La ecuación aplica para las condiciones de proceso mencionadas y se confirma el efecto positivo del porcentaje de costras en las mezclas de menas y de la temperatura del lecho en el reactor inferior (R10) sobre el contenido de hierro metálico del mineral reducido, acorde a lo expuesto teóricamente para un proceso de reducción directa en lecho fluidizado.

IV. CONCLUSION

Al aplicar la inferencia estadística para la predicción de mezclas de menas de hierro y su comportamiento en la reducción directa en lecho fluidizado se puede con-

cluir lo siguiente:

1. La predicción de una mezcla de menas de hierro, considerando las proporciones de menas duras o costras y menas blandas o friables es posible, aplicando una regresión lineal simple entre el porcentaje de costras y la pérdida por calcinación, obteniéndose una ecuación matemática estadísticamente significativa, con una bondad del ajuste adecuada y dispersión de los errores de predicción con distribución uniforme.

2. El comportamiento de una mezcla de menas de hierro en la reducción directa en lecho fluidizado puede predecirse a través del contenido de hierro metálico obtenido en el mineral reducido, aplicando una regresión lineal múltiple y considerando como variables predictoras al porcentaje de costras en la mezcla y la temperatura del lecho en el reactor inferior R10, para unas condiciones dadas de proceso.

Reconocimiento

Agradecimiento de los autores a la empresa Orinoco Iron S.C.S por permitir el desarrollo de esta investigación en sus instalaciones.

REFERENCIAS

[1]Thalhammer, O., Mogessie, A., "Ore mineralogy", Geology, vol. 3. Eolss Publishers Co. Ltd/UNESCO,

- Oxford, Reino Unido, 2009, pp 245-281, Resumen disponible en: <https://www.colss.net/sample-chapters/c01/E6-15-05-06.pdf>
- [2]Liming, L., “Iron Ore. Mineralogy, processing and environmental sustainability”, 2da. Edición, Elsevier Ltd, ISBN: 9780128202272, 2022, pp 59-107.
- [3]C.V.G. Ferrominera Orinoco C.A. “The mining of iron ore in Venezuela”, Technical presentation, FMO, 1992.
- [4]The International Organization for Standardization, “Iron ores - Determination of loss on ignition - Gravimetric method - ISO 11536:2015”, Geneva, Switzerland, 2015, p v.
- [5]Kunii, D. y Levenspiel, O., “Fluidization Engineering”, 2da. Edición, Butterworth-Heinemann, Boston, London, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington, 1991, pp 1-13.
- [6]Skorianz, M., “Classification of iron ores regarding their reduction behavior in fluidized bed technologies”, Montanuniversitaet Leoben/Chair of Metallurgy, Austria, Leoben, Tesis Doctoral, 2012, pp 47-57.
- [7]Núñez, E., “Metodología de Selección de Minerales de Hierro para el Proceso FINMET a través de Ensayos de Caracterización Mineralógica y Potencial de Metalización”, UNEXPO, Tesis de Maestría, Ciudad Guayana, Venezuela, 2008, pp 19-23.
- [8]Gleason, T., “Statistical Concepts and Methods for Process Evaluation”. Electric Furnace Steelmaking. Iron and Steel Society. BookCrafters,Inc., Chelsea, MI. U.S.A., 1985, pp 101 – 102.
- [9]Walpole, R., Myers R., Myers S. y Ye K., “Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias”. 9na. Edición. Pearson Educación, México, 2012, pp 1-3, 389-390, 272 – 273.
- [10]Wackely D., Mendenhall W. y Sheaffer R., "Estadística Matemática con Aplicaciones". 7ma. Edición. Cengage Learning Edition, S.A., México, D.F., 2010, pp 852-860.

REDES NEURONALES ARTIFICIALES APLICADAS A LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO

Tosta Rafael.
rtostam7@gmail.com
CVG, Alcasa

Resumen: Las redes neuronales artificiales (RNA), se utilizan en la industria del aluminio para optimizar procesos de producción, mejorar la calidad del producto y predecir fallos en los equipos. Por ejemplo, en la fundición de aluminio, las RNA pueden utilizarse para controlar la temperatura del horno de fundición, controlar el proceso de solidificación y predecir cuándo es necesario realizar mantenimiento preventivo en la maquinaria. Igualmente, en la detección de defectos en productos, en el control de calidad de láminas. Las RNA pueden además predecir propiedades mecánicas como resistencia, dureza o ductilidad de los materiales laminados. Por ejemplo, las RNA se pueden entrenar para predecir la microestructura resultante de un proceso de laminación en función de parámetros como la temperatura, la velocidad de laminación y la presión aplicada. También se pueden emplear para predecir propiedades del baño electrolítico, propiedades anódicas, en general todo lo relativo al proceso electrolítico.

Palabras Clave: Aluminio, Aprendizaje Automático, Inteligencia Artificial, Redes neuronales artificiales,

APPLIED ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE ALUMINUM INDUSTRY

Abstract: Artificial Neural Networks (ANN) are utilized in the aluminum industry to optimize production processes, enhance product quality, and predict equipment failures. For example, in aluminum casting, ANN can be used to control furnace temperature, manage the solidification process, and predict when preventive maintenance is necessary for machinery. Similarly, they can be applied to detect product defects and control the quality of aluminum sheets. ANN can also predict mechanical properties such as the strength, hardness, or ductility of rolled materials. For instance, ANN can be trained to predict the resulting microstructure of a rolling process based on parameters like temperature, rolling speed, and applied pressure. They can also be employed to predict properties of the electrolytic bath and anodic properties, encompassing all aspects of the electrolytic process.

Keywords: Aluminum, Machine Learning, Artificial Intelligence, Artificial Neural Networks.



I. INTRODUCCIÓN

La minería de datos de redes neuronales puede definirse como el proceso de extraer conocimiento útil y comprensible, previamente desconocido, a partir de grandes volúmenes de datos. Ya sea haciendo uso de todas las técnicas que puedan aportar información útil, desde un sencillo análisis gráfico, pasando por métodos estadísticos más o menos complejos, complementados con métodos y algoritmos del campo de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático que resuelven problemas típicos de agrupamiento automático, clasificación, predicción de valores, detección de patrones, y asociación de atributos.

Es imprescindible convertir los grandes volúmenes de datos existentes en experiencia, conocimiento y sabiduría, formas que atesora la humanidad para que sea útil a la toma de decisiones, especialmente en las grandes organizaciones y proyectos científicos.

Las diversas técnicas que se utilizan para la mejora de la calidad por lo general trabajan con relaciones lineales entre variables independientes y dependientes, lo cual es una limitación para la formulación y/o diseño de nuevos procesos, productos o servicios. Las redes neuronales artificiales permiten establecer relaciones no lineales entre variables, lo cual es una ventaja con relación a otras herramientas que se utilizan para la mejora de la calidad.

Los modelos de redes neuronales artificiales se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones de ingeniería. Por ejemplo, en el sector aluminio, para mostrar el efecto del porcentaje de brea y la porosidad del coque en la reactividad de CO₂ de los ánodos, variaciones en las propiedades mecánicas de una aleación, así como,

pueden predecir la resistencia a la corrosión de aleaciones, predecir efectos anódicos, propiedades finales en una bobina de laminación, etc.

Los métodos de redes neuronales artificiales, pueden servir como una herramienta útil para predecir el efecto de diferentes parámetros que afectan los diferentes procesos del sector aluminio.

II. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las redes neuronales artificiales son un tipo de algoritmo de aprendizaje automático inspirado en el funcionamiento del cerebro humano. A través de la imitación de la red neuronal biológica, estas redes artificiales pueden analizar y procesar grandes cantidades de información de manera eficiente. Su capacidad para aprender y adaptarse las hace valiosas para la toma de decisiones en diversos sectores, lo que demuestra su relevancia en el ámbito actual. [1][2] Cada neurona artificial está conectada a otras neuronas a través de conexiones llamadas pesos, que determinan la fuerza y dirección de la señal transmitida.

Una red neuronal, es un conjunto interconectado de unidades llamadas neuronas artificiales (ver figura 1) o nodos, que trabajan juntas para procesar y analizar información. La capacidad de las redes neuronales para aprender se basa en un proceso llamado entrenamiento. Durante el entrenamiento, se presentan a la red neuronal ejemplos de datos junto con las respuestas esperadas, y la red ajusta los pesos de las conexiones para minimizar la diferencia entre las salidas producidas y las respuestas esperadas. Este proceso de ajuste iterativo permite que la red neuronal mejore su rendimiento y capacidad para realizar tareas específicas.

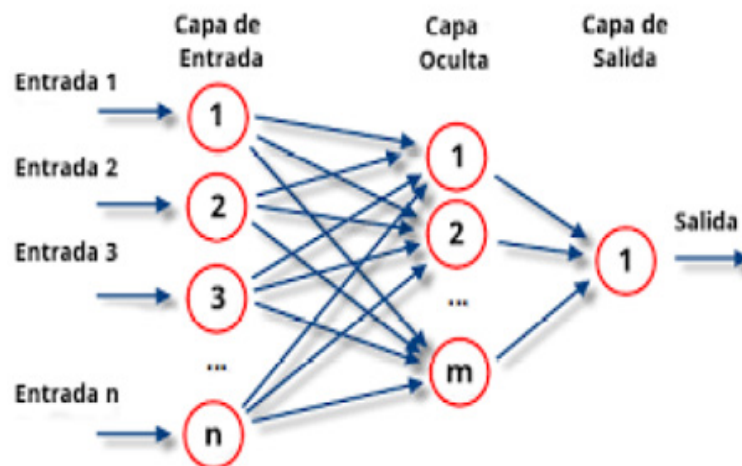


Figura 1: Modelo de Red Neuronal [3]

La arquitectura de la red neuronal es la estructura de capas y conexiones que tiene la red. En las redes neuronales se distinguen tres capas: de salida, oculta y, de entrada. La capa de entrada, está formada por neuronas que se encargan de recibir datos o señales del entorno, La capa de salida contiene las neuronas que proporcionan la respuesta de la red. La capa oculta o intermedia no tiene ninguna conexión directa con el entorno.

Existen varios tipos de redes neuronales, cada una diseñada para resolver problemas específicos y adaptarse a diferentes tipos de datos. Algunos de los tipos más comunes son.[4][5][6]

Redes Neuronales Feedforward (FNN)

Conocidas como redes neuronales de propagación hacia adelante, la información fluye en una sola dirección, desde la capa de entrada, a través de las capas ocultas, si es que hay, claro; hasta llegar a la capa de salida. Las FNN se utilizan en tareas de clasificación, regresión y otras tareas donde los datos pueden ser representados como vectores de características independientes.

Redes Neuronales Convolucionales (CNN)

Las CNN están diseñadas para procesar datos con estructura espacial como imágenes, esto se debe a que utilizan operaciones de convolución para extraer características y luego aprenden a clasificar y reconocer objetos en función de esas características.

Redes Neuronales Recurrentes (RNN)

Las RNN son capaces de procesar datos secuenciales, como texto, audio o series temporales. La característica distintiva de este tipo de red neuronal es que tienen conexiones con retroalimentación que les permiten mantener un estado interno y recordar información previa. Por esto es que son adecuadas para tareas como el reconocimiento de voz, traducción automática y generación de texto, donde el contexto y la secuencia son fundamentales.

Redes Neuronales Generativas Adversariales (GAN)

Las GAN son una arquitectura especial de redes neuronales que consiste en dos redes en competencia: un generador y un discriminador. A medida que ambas redes se entrenan, el generador mejora su capacidad para generar datos cada vez más realistas, mientras que el discriminador mejora su capacidad para detectar la falsedad. Por lo general se utilizan para la generación de imágenes realistas.

Redes Neuronales de Memoria a Corto Plazo (LSTM)

Las LSTM son como una variante de las RNN, pero en este caso están diseñadas para superar el problema del desvanecimiento del gradiente en el entrenamiento de secuencias largas.

Redes Neuronales Autoencoders

Los autoencoders son redes que se utilizan en tareas de codificación y decodificación de datos. Mientras una capa codifica y reduce la dimensionalidad de los datos de entrada, la otra se encarga de la decodificación que intenta reconstruir los datos originales.

Redes Neuronales Transformadoras (BERT)

Las BERT son una arquitectura de redes neuronales que revolucionó el procesamiento del lenguaje natural porque utilizan atención bidireccional para procesar texto y capturar relaciones complejas entre las palabras.

III.APLICACIONES DE LAS RNA EN LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO

Alúmina

El primer paso para la obtención de aluminio, es transformar la bauxita mediante el proceso Bayer en alúmina. La Bauxita es un mineral parecido a la arcilla, el cual consiste básicamente en una alúmina hidratada con algo de hidróxido de hierro, sílice, y otros óxidos. En el proceso Bayer, primero se tritura la bauxita y luego se lava con una solución caliente de hidróxido de sodio, esta solución disuelve los minerales contentivos de aluminio, manteniendo sólidos los otros componentes de la bauxita, las reacciones químicas que ocurren en esta etapa se le llama digestión. Luego se retiran los sólidos no disueltos en un decantador seguido de unos filtros, los sólidos del decantador se les denomina lodos rojos, estos son tratados para recuperar el hidróxido de sodio que se recicla en el proceso. La solución libre de impurezas se precipita de manera controlada para formar hidróxido de aluminio, este hidróxido se calienta a una temperatura aproximada de 1050 °C, en una operación llamada calcinación para convertirlo en alúmina que será usada en el proceso de electrólisis.

Zaknick (1997)[7], logro automatizar el proceso de aislamiento y caracterización de partículas de hidróxido de aluminio del proceso Bayer, el cual se realizaba con microscopio electrónico de barrido por humanos expertos, mediante varios algoritmos de procesamiento de imágenes, el uso de clasificadores bayesianos y de redes neuronales. El sistema fue diseñado para ser utilizado como una herramienta de investigación para estudiar

relaciones entre las propiedades de las partículas y los parámetros de la planta.

Chelhani[8] estudio la recuperación por lixiviación de alúmina en el proceso Bayer mediante métodos de regresión y de redes neuronales artificiales. Los resultados de los estudios de regresión multivariable fueron insignificantes. La red neuronal de regresión generalizada mejoró el coeficiente de correlación a un nivel aceptable de 0,86, determinando que las RNA podrían aplicarse como un nuevo método para la predicción de la recuperación por lixiviación en el Proceso Bayer

Mihajlovic et al[9], presentaron los resultados del uso de redes neuronales artificiales y del modelado estadístico del proceso lixiviación de la bauxita., como parte de la tecnología Bayer para la producción de alúmina. La herramienta de modelado estadístico fue la regresión lineal múltiple. El modelo estadístico se desarrolló como un intento de definir la dependencia del grado de recuperación de alúmina sobre las variables de entrada del proceso de lixiviación, es decir, la composición de la bauxita, la composición del sodio, la solución de aluminato y el módulo cáustico de la solución antes y después del proceso de lixiviación. La variable dependiente, que era el objetivo principal del procedimiento de modelado, fue el grado de recuperación de alúmina. El nivel obtenido usando el modelo estadístico fue $R^2= 0.463$ mientras que la RNA fue de $R^2= 0,723$. De esta forma, el modelo definido mediante la metodología RNA podría usarse para la predicción eficiente del grado de recuperación de alúmina como en función de los insumos del proceso, bajo las condiciones industriales.

Suárez F. (2004),[10] en su tesis de grado, desarrolló un sistema de visualización de variables de los tanques lavadores/espesadores del proceso Bayer, considerando las redes neuronales artificiales de backpropagation, obteniendo un rendimiento del 0,5% al 1%.

Posteriormente Suárez et al (2018) [10], diseñaron un sistema de supervisión inteligente basado en un modelo neuronal, con el fin de optimizar el proceso Bayer y controlar las variables en los tanques de lavado del proceso de producción de alúmina.

Mahmoudian et al,[11] estudiaron, la predicción de la eficiencia de recuperación de alúmina, cantidad de lodo rojo producido, la tasa de sedimentación de lodo rojo y las pérdidas de soda ligadas al lodo rojo del proceso Bayer. Basándose en una función de base radial, el método de regresión lineal múltiple y perceptrón multicapa como red neuronal artificial. Ellos encontraron que el método de función de base radial supero a los métodos regresión lineal múltiple y perceptrón multicapa en la eficiencia de recuperación de alúmina, la cantidad de lodo rojo producido, y las pérdidas de soda ligadas al

lodo rojo. Sin embargo, el perceptrón multicapa genero resultados mejores y más precisos en la predicción de la sedimentación de lodo rojo.

Reducción

El proceso Hall Héroult, es el principal proceso de obtención de aluminio, en este proceso la alúmina es disuelta dentro de una cuba revestida interiormente de material carbonoso generalmente grafitico o semi-grafítico, en un baño electrolítico de criolita fundida y otras sales. La cuba actúa como cátodo, mientras que los ánodos están compuestos de coque de petróleo en diferentes granulometrías, alquitrán de hulla y restos de ánodos. La alúmina se descompone en aluminio metálico y oxígeno molecular mediante un proceso de reducción, el aluminio al ser más denso que el baño electrolítico se deposita en el fondo de la cuba, mientras que el oxígeno interactúa con los ánodos consumiéndose estos generando CO y CO₂.

Dion et al[12], Desarrollaron un algoritmo para predecir efectos anódicos de bajo voltaje y evaluar las cantidades de gases fluorados emitidos durante los mismos, la validación indico que el porcentaje de error en la predicción fue del 13%, con ello demostraron el poder de las RNA en procesos de reducción.

Bhattacharyay et al[13]. demostraron que las RNA son una herramienta matemática que puede manejar datos muy complejos. En su trabajo, utilizaron el software Matlab para desarrollar una serie de modelos de RNA, usando datos publicados, y los compararon con pruebas de análisis lineal multi variables determinando las ventajas del método feed-forward multicapa sobre el análisis lineal.

Kocaefe et al, 2014[14], en vista de lo difícil que es correlacionar una propiedad anódica determinada con un componente particular de una materia prima, y debido a la falta de una buena relación matemática disponible para tal correlación. Demostraron que, el sistema de red neuronal artificial puede ser una herramienta predictiva útil para analizar el efecto de una variable en una deseada propiedad del ánodo. El análisis proporciona una idea del efecto de diferentes parámetros en las propiedades del ánodo, y a su vez, ayuda a mejorar la calidad de los mismos

Chermont et al[15], presentaron un modelo basado en RNA de una sola capa para las variables químicas del baño. El modelo se construyó utilizando un algoritmo de aprendizaje automático muy rápido, también aplicaron análisis estadístico para la recopilación, preprocesamiento y filtrado de los datos. Para la validación realizaron varias simulaciones para certificar la capacidad del modelo neuronal. Realizaron una comparación

del modelo con estructuras lineales y no lineales para mostrar que se pueden aplicar las RNA de una sola capa en el modelado de la química de baño.

Bhattacharyay et al[16]. Determinaron que, al no existir una relación matemática bien conocida entre las diversas propiedades físicas y químicas de las materias primas y las propiedades finales del ánodo, los métodos de redes neuronales artificiales podían servir como una herramienta útil para predecir dichas propiedades. En el estudio, utilizaron datos publicados para mostrar el dominio de diferentes redes neuronales artificiales utilizando el software Matlab. El error medio entre los valores previstos y experimentales fue de alrededor del 6%. La red neuronal artificial también se utilizó para identificar el efecto de impurezas como vanadio, hierro, sodio y azufre en la reactividad al CO₂ de los ánodos, la RNA también mostró el efecto del porcentaje de brea y la porosidad del coque en la reactividad al CO₂ de los ánodos. El efecto de las reactividades del CO₂ y del aire también se estudió y encontraron que las predicciones estaban de acuerdo con los resultados de otros estudios en la literatura.

Fernández et al[17], en vista de que la producción primaria de aluminio es un proceso ininterrumpido y complejo que debe operar en un circuito cerrado, lo cual dificulta las posibilidades de realizar experimentos para mejorar la producción, y lo peligroso y costoso que resulta una intervención directa en planta decidieron simular el proceso sin intervención directa, para ello combinaron datos reales con técnicas de RNA y métodos de agrupación para crear sensores blandos y estimar la temperatura del baño, el porcentaje de fluoruro de aluminio en el baño, y el nivel de metal en la celda. Los resultados demostraron la efectividad y viabilidad del enfoque propuesto para sensores blandos en la industria del aluminio que puede mejorar el control de procesos y ahorrar recursos.

Fundición

La fundición de aluminio es un proceso fundamental en la industria moderna que posibilita la creación de una extensa gama de productos y componentes claves. Lingotes, chatarra, aluminio líquido, y aleantes se introducen en un horno de fundición de aluminio. Se aplica calor para elevar la temperatura del metal por encima de su punto de fusión, que ronda los 660.3°C y garantizar la fusión y homogeneidad del conjunto. En el proceso de fundición, el aluminio tiene la capacidad de absorber gases, como hidrógeno o metales alcalinos, generando la presencia de burbujas en el material. Para prevenir este fenómeno, se emplean técnicas como la desgaseificación mediante agentes químicos y la agitación, con

el objetivo de eliminar dichas burbujas. Una vez que el aluminio está completamente fundido y purificado, se vierte en el molde a través de canales específicos. El proceso de solidificación es crucial para garantizar la calidad del producto final. La velocidad de enfriamiento influye en las propiedades del producto.

Saracibar[18] propone una formulación basada en RNA para obtener la energía de activación para la disolución de precipitados con endurecimiento

En vista de que es obligatorio cumplir con los estándares internos de los fabricantes de equipos originales para garantizar la calidad de los productos, se optimizan los diseños y se utilizan nuevos materiales. Pero han surgido nuevas tecnologías, como la ingeniería computacional integrada de materiales, que es una herramienta valiosa para pronosticar a través de características de una aleación si cumple con los requisitos sin fabricarla. Jiménez et al[19], desarrollaron una red neuronal artificial para establecer la composición química de una nueva aleación de aluminio basada en las características de fabricación deseadas. Los resultados de la red neuronal artificial propuesta muestrearon una correlación promedio del 99,33% entre sus pronósticos y pruebas de laboratorio.

Laminación

Bagheripoor[20] presenta una aplicación de RNA para un laminador en caliente a fin predecir varios parámetros del proceso, los resultados se compararon con predicciones de un modelo en elementos finitos. El modelo obtenido por RNA es factible para el control en línea y la optimización del programa de laminación y puede cubrir diferentes grados de aluminio y tamaños de banda generando datos de entrenamiento a partir de un modelo en elementos finitos.

Los laminadores de aluminio comerciales operan bajo condiciones termo mecánicas muy restringidas determinadas a partir de la experiencia en planta, Barat et al[21], presentan los resultados de un laminador tándem de cuatro soportes para evaluar la textura de una banda de aluminio deformada en caliente después de un proceso de recocido. Luego realizaron un estudio de modelado de redes neuronales para encontrar una función predictiva. entre la textura observada y los parámetros termo mecánicos de deformación, velocidad de deformación y temperatura. El modelo sugirió que la temperatura es la principal variable que influye en la textura.

IV.CONCLUSIONES

Las RNA ofrecen diversas ventajas a la industria del aluminio, tales como, modelado de datos complejos, reducción de chatarra y defectos, eficiencia en el proceso

de producción, así como, predecir y procesar grandes cantidades de datos de manera rápida y eficiente lo que permite analizar información en tiempo real y tomar decisiones de forma eficiente.

REFERENCIAS

- [1] X. Basogain, *Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones*. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Bilbao. UPV-EHU.
- [2] J. A. Escobar, “Introducción a las Redes Neuronales,” [Online]. Available: <https://www.halweb.uc3m.es/esp/personal/personas/jmmarin/esp/DM/tema3dm.pdf>
- [3] “Componentes de una Red Neuronal.” [Online]. Available: <https://www.datasmarts.net/componentes-de-una-red-neuronal/>
- [4] “Redes Neuronales.” <https://www.thepower.education/blog/redes-neuronales>
- [5] “Que es una Red Neuronal.” <https://www.thedatascchools.com/que-es-una-red-neuronal/>
- [6] J. Vorobioff, S. Cerrotta, N. Morel, and A. Amadio, “Inteligencia Artificial y Redes Neuronales Fundamentos, Ejercicios y Aplicaciones,” 2022. doi: ISBN 9789874998828.
- [7] A. Zaknich, “Characterization of Aluminum Hydroxide Particles from the Bayer Process Using Neural Network and Bayesian Classifiers,” *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 8, no. 4, 1997.
- [8] C. Chelgani and E. Jorjani, “Artificial Neural Network Prediction of Al₂O₃ Leaching Recovery in the Bayer Process-Jajarm Alumina Plant (Iran),” *J. Hydrometall.*, vol. 97, no. 1–2, pp. 105–110, 2009, doi: 10.1016/j.hydromet.2009.01.008.
- [9] I. Milosevic, I. Mihajlovic, and Z. Zivkovic, “Artificial Neural Network Prediction of Aluminum Extraction from Bauxite in the Bayer Process,” *J. Serbian Chem. Soc.*, vol. 77, no. 9, pp. 1259–1271, 2012, doi: 10.2298/JSC110526193D.
- [10] F. Suárez, P. Sucre, and G. Almeida, “Inteligencia Artificial en el Proceso de Obtención de Alúmina,” *Universidad, Cienc. y Tecnol.*, vol. 22, no. 88, pp. 48–56, 2018.
- [11] M. Mahmoudian, A. Ghaemi, H. Hashemabadi, and S. Shahhosseini, “Comparing the Capability of Various Models for Predicting the Bayer Process Parameters,” *J. Adv. Mater. Process.*, vol. 6, no. 1, pp. 71–86, 2018.
- [12] L. Dion, C. Lagace, L. Kiss, and S. Poncsak, “Using Artificial Neural Network To Predict Low Voltage Anode Effect PFCS At The Duct End Of An Electrolysis Cell,” in *Light Metals 2016*, 2016.
- [13] D. Bhattacharyay, D. Kocaefe, Y. Kocaefe, B. Morais, and M. Gagnon, “Application of the Artificial Neural Network (ANN) in Predicting Anode Properties,” in *Light Metals 2013*, 2013.
- [14] D. Kocaefe, A. Sarkar, Y. Lu, D. Bhattacharyay, Y. Kocaefe, and B. Morais, “Utilization of Artificial Neural Network to Analyze and Predict the Influence of Different Parameters on Anode Properties,” in *11th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference*, United Arab Emirates, 2014.
- [15] P. Chermont, F. Soares, and R. Oliveira, “Simulations on the Bath Chemistry Variables Using Neural Networks,” in *Light Metals 2016*, 2016.
- [16] D. Bhattacharyay, D. Kocaefe, Y. Kocaefe, and B. Morais, “An Artificial Neural Network Model for Predicting the CO₂ Reactivity of Carbon Anodes Used in the Primary Aluminum Production,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 28, pp. 553–563, 2017, doi: 10.1007/s00521-015-2093-7.
- [17] A. Fernandez et al., “Soft Sensors in the Primary Aluminum Production Process Based on Neural Networks Using Clustering Methods,” *Sensors*, 2019. <https://www.mdpi.com/journal/sensors>
- [18] A. Saracibar, R. López, B. Ducoeur, M. Chiumentì, and B. Meester, “Un Modelo Numérico Para la Simulación de Disolución de Precipitados en Aleaciones de Aluminio con Endurecimiento Utilizando Redes Neuronales,” *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 29, no. 1, pp. 29–37, 2013, doi: 10.1016/j.rimni.2012.02.003.
- [19] M. Jimenez, M. Alfaro, and C. Muñoz, “Design of an Aluminum Alloy Using a Neural Network Based Model,” *Metals (Basel)*, vol. 12, 2022, doi: 10.3390/met12101587.
- [20] M. Bagheripoor and H. Bisadi, “Application of Artificial Neural Network for the Prediction of Roll Force and Roll Torque in Hot Rolling Process,” *Appl. Math. Model.*, vol. 37, pp. 4593–4607, 2013, doi: 10.1016/j.apm.2012.09.070.
- [21] P. Barat and P. Withers, “Neural Network Modeling for the Prediction of Texture Evolution of Hot Deformed Aluminum Alloys,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 12, no. 6, pp. 623–628, 2003, doi: 10.1361/105994903322692402.

ROBÓTICA INDUSTRIAL COLABORATIVA

Custodio Ángel.

acustodio@unexpo.edu.ve

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”

Resumen: La robótica industrial colaborativa está revolucionando la industria al permitir una interacción segura y eficiente entre robots y humanos en un entorno de producción. Este artículo explora las diferencias entre robótica y automatización, los beneficios, tipos, aplicaciones y consideraciones de seguridad de los robots colaborativos. También se discuten las ventajas de la interacción humano-robot, así como las tendencias y desarrollos futuros en este campo. A través de estudios de caso y ejemplos prácticos, se demuestra cómo los robots colaborativos están mejorando la productividad y la calidad en diversas industrias. El artículo concluye con una discusión sobre el futuro de la robótica colaborativa y su potencial para revolucionar los procesos industriales.

Palabras Clave: Robots colaborativos, Industria 4.0, Automatización, Seguridad en robótica.

COLLABORATIVE INDUSTRIAL ROBOTICS

Abstract: Collaborative industrial robotics is revolutionizing the industry by enabling safe and efficient interaction between robots and humans in a production environment. This article explores the differences between robotics and automation, as well as the benefits, types, applications, and safety considerations of collaborative robots. The advantages of human-robot interaction are also discussed, along with future trends and developments in the field. Through case studies and practical examples, it is demonstrated how collaborative robots are improving productivity and quality in various industries. The article concludes with a discussion on the future of collaborative robotics and its potential to revolutionize industrial processes.

Keywords: Collaborative robots, Industry 4.0, Automation, Robotics safety.



I.INTRODUCCIÓN

La robótica industrial colaborativa se refiere al uso de robots diseñados para trabajar de manera segura y efectiva junto a los humanos en entornos de manufactura y producción. A diferencia de los robots tradicionales, que suelen operar en áreas aisladas y sin interacción con humanos, los robots colaborativos, o "cobots", están equipados con sensores avanzados y tecnologías de inteligencia artificial que les permiten detectar y reaccionar a la presencia humana, garantizando así un entorno de trabajo seguro y colaborativo [1-7].

La implementación de robots colaborativos en la industria es un componente clave de la Industria 4.0, que busca integrar tecnologías avanzadas para optimizar la eficiencia y flexibilidad de los procesos de producción. Los cobots ofrecen varias ventajas, incluyendo la capacidad de realizar tareas repetitivas y peligrosas, mejorar la precisión y consistencia en la producción, y liberar a los trabajadores humanos para que se concentren en actividades de mayor valor añadido.

II.TECNOLOGÍAS CLAVES

A. Sensores y Actuadores

Los cobots están equipados con avanzados sensores que permiten la detección precisa del entorno y la presencia humana, garantizando una operación segura. Los sensores táctiles, visuales y de proximidad son fundamentales para la interacción humano-robot, permitiendo a los cobots detenerse o ajustar su movimiento al detectar una presencia humana. Los actuadores, por otro lado, proporcionan movimientos precisos y controlados, adaptándose dinámicamente a las tareas colaborativas [8-11].

B.Inteligencia Artificial y Machine Learning

La implementación de algoritmos de inteligencia artificial (IA) y machine learning permite a los cobots aprender de la interacción con los humanos, mejorando su desempeño y adaptabilidad en diversas tareas. La IA permite a los cobots analizar datos en tiempo real, optimizar rutas de movimiento y adaptarse a cambios en el entorno de trabajo, lo que resulta en una mayor eficiencia operativa.

III.ROBÓTICA VS AUTOMATIZACIÓN

La ingeniería de automatización se refiere al desarrollo y diseño de sistemas, máquinas y otras herramientas utilizadas para la realización de tareas normalmente hechas por humanos. La automatización es un término amplio que incluye agentes de software sin hardware, PLCs (controladores lógicos programables - hardware)

y subcategorías, incluida la robótica, que puede entenderse mejor como una subcategoría de la automatización.

Mientras que la robótica tradicional se caracteriza por hardware fijo diseñado específicamente para una única parte del proceso de producción, los cobots son móviles y fáciles de reprogramar para distintas tareas. Los robots tradicionales pueden ser excelentes en tareas específicas, pero los cobots ofrecen alta flexibilidad y el potencial para su reutilización a gran escala en toda la fábrica.

IV.BENEFICIOS DE LA ROBÓTICA COLABORATIVA

A.Mayor Seguridad

Los robots colaborativos están diseñados con características de seguridad avanzadas que minimizan el riesgo de accidentes. Esto permite que los humanos y los robots compartan el mismo espacio de trabajo de forma segura.

B.Aumento de la Productividad

La colaboración humano-robot permite automatizar tareas repetitivas y peligrosas, liberando a los humanos para que se enfoquen en tareas más complejas y creativas.

C.Flexibilidad y Adaptabilidad

Los robots colaborativos son fáciles de programar y reprogramar, lo que facilita su adaptación a diferentes tareas y procesos. Esto los hace ideales para entornos de producción cambiantes.

D.Reducción de Costos

La robótica colaborativa puede reducir los costos operativos al automatizar tareas y mejorar la eficiencia. También puede liberar a los humanos para que se enfoquen en actividades de mayor valor.

V.TIPOS DE ROBOTS COLABORATIVOS

A.Robots Articulados

Estos robots tienen una estructura similar a la de un brazo humano, con múltiples articulaciones que les permiten moverse con flexibilidad y precisión.

B.Robots Cartesianos

Estos robots se mueven a lo largo de tres ejes lineales, lo que los hace ideales para aplicaciones de precisión y manipulación.

C.Robots SCARA

Estos robots son conocidos por su alta velocidad y precisión en tareas de montaje y manipulación, especialmente en aplicaciones que requieren movimientos en un plano horizontal.

VI.APLICACIONES

La robótica colaborativa tiene una amplia gama de aplicaciones en diferentes sectores. En las líneas de ensamblaje, los cobots trabajan junto a los operarios humanos, manejando tareas repetitivas y pesadas, mientras los humanos se enfocan en tareas que requieren habilidades cognitivas y de resolución de problemas. En la manipulación de materiales, los cobots mejoran la eficiencia y reducen el riesgo de lesiones para los trabajadores. Además, en los procesos de control de calidad, los cobots realizan inspecciones precisas y repetitivas, garantizando la consistencia y calidad de los productos.

A.Ensamblaje

En líneas de ensamblaje, los cobots trabajan junto a los operarios humanos, manejando tareas repetitivas y pesadas, mientras los humanos se enfocan en tareas que requieren habilidades cognitivas y de resolución de problemas. Un estudio realizado por la International Federation of Robotics (IFR) mostró que la integración de cobots en el ensamblaje puede aumentar la productividad hasta en un 30% [12-13].

B.Manipulación de Materiales

La manipulación de materiales es otra área donde los cobots han demostrado su valía, mejorando la eficiencia y reduciendo el riesgo de lesiones para los trabajadores. Los cobots pueden manejar cargas pesadas y realizar movimientos repetitivos de manera precisa, lo que reduce la fatiga y el riesgo de errores humanos.

C.Control de Calidad

Los cobots también se utilizan en procesos de control de calidad, realizando inspecciones precisas y repetitivas, garantizando la consistencia y calidad de los productos. Por ejemplo, en la industria electrónica, los cobots pueden inspeccionar placas de circuito impreso con una precisión superior a la del ojo humano, detectando defectos minúsculos y asegurando altos estándares de calidad.

VII.CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

A.Evaluación de Riesgos

Es fundamental identificar y evaluar los riesgos potenciales que pueden surgir al integrar robots colabora-

tivos en el entorno de trabajo.

B.Diseño de Seguridad

Los robots colaborativos deben estar diseñados con características de seguridad integradas, como sensores de proximidad, límites de fuerza y sistemas de parada de emergencia.

C.Capacitación y Entrenamiento

Es importante proporcionar capacitación adecuada a los trabajadores sobre cómo operar y colaborar con los robots colaborativos de forma segura.

D.Monitoreo y Mantenimiento

El monitoreo regular y el mantenimiento preventivo de los robots colaborativos son esenciales para garantizar su seguridad y rendimiento a largo plazo.

VIII.INTEGRACIÓN DE ROBOTS COLABORATIVOS EN EL ENTORNO DE TRABAJO

A.Planificación y Diseño

Definir el proceso de integración, las tareas a automatizar y la configuración del robot.

B.Instalación y Puesta en Marcha

Instalar el robot, conectar los sistemas de seguridad y configurar el software.

C.Programación y Entrenamiento

Programar el robot para realizar las tareas deseadas y entrenar a los trabajadores sobre su uso.

D.Prueba y Validación

Probar el rendimiento del robot y validar que cumple con los requisitos de seguridad y calidad.

IX.VENTAJAS DE LA INTERACCIÓN HUMANO-ROBOT

A.Mayor Flexibilidad y Adaptabilidad

Los humanos pueden proporcionar la creatividad e improvisación necesarias para adaptarse a tareas no programadas o cambios imprevistos.

B.Toma de Decisiones Conjunta

Los robots pueden proporcionar datos y análisis, mientras que los humanos aportan la experiencia y el juicio para tomar decisiones informadas.

C.Mejor Eficiencia y Productividad

La combinación de habilidades humanas y robóticas permite optimizar procesos y aumentar la productividad general.

X.DESAFÍOS

A.Seguridad

A pesar de los avances, la seguridad sigue siendo un desafío crítico. Es esencial desarrollar y adherir a estrictas normas de seguridad para garantizar la interacción segura entre humanos y cobots. La norma ISO/TS 15066 establece requisitos para la seguridad de los cobots, pero la implementación efectiva requiere una evaluación continua y ajustes en el entorno de trabajo.

B.Integración

La integración de cobots en las líneas de producción existentes puede ser compleja y costosa, requiriendo una planificación cuidadosa y adaptaciones significativas en algunos casos. La interoperabilidad entre cobots y sistemas de automatización existentes es crucial para maximizar los beneficios de la robótica colaborativa.

C.Aceptación de Usuario

La aceptación por parte de los operarios humanos es crucial para el éxito de la robótica colaborativa. Es necesario educar y capacitar a los trabajadores para que se sientan cómodos y confiados al trabajar con cobots. La resistencia al cambio puede ser un obstáculo, por lo que las empresas deben involucrar a los empleados en el proceso de implementación y destacar los beneficios para su trabajo diario.

XI.FUTURAS DIRECCIONES [14-18]

A.Desarrollo de Tecnologías Avanzadas

El desarrollo continuo de tecnologías avanzadas, como sensores más precisos y algoritmos de inteligencia artificial más sofisticados, seguirá impulsando la robótica colaborativa. Las innovaciones en la percepción y la toma de decisiones autónoma permitirán a los cobots asumir tareas más complejas y trabajar en entornos más dinámicos.

B.Expansión a Nuevas Industrias

La expansión de la robótica colaborativa a industrias más allá de la manufactura, como la atención médica y la logística, abrirá nuevas oportunidades y desafíos. En la atención médica, por ejemplo, los cobots pueden asistir en cirugías, proporcionando precisión y reduciendo la fatiga del cirujano.

C.Normativas y Estándares

El establecimiento de normativas y estándares globales es esencial para garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas robóticos colaborativos. Las organizaciones internacionales deben colaborar para desarrollar directrices que faciliten la adopción segura y eficaz de cobots en diversas industrias.

D.Inteligencia Artificial

Los robots colaborativos están incorporando tecnologías de IA para mejorar su capacidad de aprendizaje, adaptación y toma de decisiones.

E.Computación en la Nube

La computación en la nube permite a los robots acceder a grandes cantidades de datos y potencia de procesamiento, mejorando su capacidad y rendimiento.

F.Visión Artificial

Los sistemas de visión artificial permiten a los robots identificar objetos, navegar por entornos complejos y trabajar de forma más autónoma.

G.Robótica Modular

Los robots colaborativos modulares se pueden configurar y adaptar fácilmente para diferentes tareas, aumentando su flexibilidad y versatilidad.

XII.CONCLUSIONES

La robótica colaborativa ha demostrado su eficacia en una amplia gama de sectores, incluyendo la fabricación, la logística, la atención médica y la investigación. Empresas como BMW, Ford y Amazon utilizan robots colaborativos para automatizar procesos y mejorar la eficiencia. En la atención médica, los robots colaborativos se utilizan para realizar cirugías complejas, brindar asistencia a los pacientes y acelerar el proceso de rehabilitación.

La robótica colaborativa es una tecnología innovadora que está transformando la forma en que las personas y los robots trabajan juntos. Sus beneficios son numerosos, desde un aumento de la productividad y la seguridad hasta una mayor flexibilidad y adaptabilidad. El futuro de la robótica colaborativa es prometedor, con nuevas tecnologías y aplicaciones que se están desarrollando constantemente. La colaboración humano-robot está destinada a jugar un papel fundamental en la transformación digital de las empresas y las industrias.

REFERENCIAS

- [1]G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.
- [2]W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-135.
- [3]H. Poor, *An Introduction to Signal Detection and Estimation*. New York: Springer-Verlag, 1985, ch. 4.
- [4]J. U. Duncombe, "Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-11, pp. 34-39, Jan. 1959.
- [5]S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks," *IEEE Trans.*

Neural Networks, vol. 4, pp. 570-578, July 1993.

[6]R. W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," Bell Syst. Tech. J., vol. 44, no. 4, pp. 547-588, Apr. 1965.

[7]International Federation of Robotics, "Collaborative Robots and the Future of Work," 2021.

[8]ISO/TS 15066, "Safety Requirements for Collaborative Industrial Robots," International Organization for Standardization, 2016.

[9]J. U. Duncombe, "Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-11, pp. 34-39, Jan. 1959.

[10]H. Poor, An Introduction to Signal Detection and Estimation. New York: Springer-Verlag, 1985, ch. 4.

[11]S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 4, pp. 570-578, July 1993.

[12]R. W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," Bell Syst. Tech. J., vol. 44, no. 4, pp.

547-588, Apr. 1965.

[13]International Federation of Robotics, "Collaborative Robots and the Future of Work," 2021.

[14]ISO/TS 15066, "Safety Requirements for Collaborative Industrial Robots," International Organization for Standardization, 2016.

[15]J. U. Duncombe, "Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-11, pp. 34-39, Jan. 1959.

[16]H. Poor, An Introduction to Signal Detection and Estimation. New York: Springer-Verlag, 1985, ch. 4.

[17]S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 4, pp. 570-578, July 1993.

[18]R. W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," Bell Syst. Tech. J., vol. 44, no. 4, pp. 547-588, Apr. 1965.

