

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

1. Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: 71108			
Título del proyecto: EFECTO DEL CONTENIDO DE ALUMINIO EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL SISTEMA DE NUEVAS ALEACIONES Fe-Mn-Al-C COMO POTENCIAL REEMPLAZO DE ACEROS INOXIDABLES			
Facultad o Instituto Académico: Ciencias Exactas			
Departamento o Escuela: Física			
Grupo (s) de investigación: Grupo de Metalurgia Física y Teoría de Transiciones de Fase (GMTF), Grupo de Investigación en Tribología, Polímeros, Metalurgia de Polvos y Transformación de Residuos Sólidos (TPMR), Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial (GIMI) y Grupo de Investigación de Análisis de Superficie y Óxidos del Instituto de Química Física "Rocasolano" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid, España).			
Entidades: Universidad del Valle			
Palabras claves: Aleación Fe-Mn-Al-C, corrosión, medio ácido, medio básico, medio salino.			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	German Antonio Pérez	5 h/s	5 h/s
	Jesús Anselmo Tabares	5 h/s	5 h/s
Coinvestigadores	Yesid Aguilar Castro	2 h/s	2 h/s
	Jairo Antonio Valdés	2 h/s	2 h/s
	Oscar Alexander Zambrano	10 h/s	10 h/s
	José Francisco Marco	2 h/s	2 h/s
	Juan Sebastián Rodríguez	40 h/s	40 h/s

2. Resumen ejecutivo:

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

Los aceros Fe-Mn-Al-C han despertado la atención de la comunidad científica debido a las excelentes propiedades que han mostrado a lo largo de numerosos estudios que se han realizado en estos, como también su potencial de reemplazo de diversas aleaciones, debido al bajo costo de los principales elementos aleantes de estos aceros (manganeso y aluminio). En este sentido, el estudio de los aceros Fe-Mn-Al-C frente a la corrosión electroquímica surge bajo la necesidad de conocer la respuesta, ventajas y desventajas de estas aleaciones frente a los medios corrosivos más comunes (medios ácidos y básicos) que puedan presentarse en condiciones industriales.

Para el desarrollo de este trabajo, se fundieron en un horno de inducción el siguiente sistema de aleaciones Fe-20Mn-xAl-0.7C ($x=0,3,6,9$), las cuales fueron posteriormente tratadas termo mecánicamente para lograr una condición de granos equiaxiales, condición conocida industrialmente como condición de “suministro”, debido a las buenas propiedades mecánicas encontradas en este estado. Adicionalmente, el estudio de este acero se comparó frente al comportamiento de aceros comerciales muy usados en la industria AISI 1020 y 304L para comparar la resistencia a la corrosión frente a estos. Mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-x (XPS) se estudiaron las superficies corroídas bajo los electrolitos de estudios, para determinar el comportamiento de la capa pasiva frente a estos, como también el rol que juegan cada uno de los elementos en el proceso.

Finalmente, se logró determinar el efecto del contenido de aluminio frente a estos procesos de corrosión, en la cual para medio ácidos (H_2SO_4 y HCl), disminuye notablemente la capacidad pasivante de la capa, facilitando la corrosión y generando valores alto de densidad de corrosión frente a los aceros AISI 1020 y 304L. Por otro lado, el comportamiento del aluminio en la corrosión de medios básicos ($NaOH$ y $NaCl$) genera bajos valores de densidad de corrosión a medida que el contenido de Al aumenta.

Fe-Mn-Al-C steels have attracted the attention of the scientific community due to the excellent properties they have shown throughout numerous studies that have been carried out on these, as well as their replacement potential for various alloys, due to the Low cost of the main alloying elements of these steels (manganese and aluminum). In this sense, the study of Fe-Mn-Al-C steels against electrochemical corrosion arises under the need to know the response, advantages and disadvantages of these alloys against the most common corrosive media (acidic and basic media) that may occur in industrial conditions.

For the development of this work, the following Fe-20Mn-xAl-0.7C alloy system ($x = 0,3,6,9$) was melted in an induction furnace, which was subsequently heat treated mechanically to achieve a condition of equiaxial grains, a condition known industrially as a "supply" condition, due to the good mechanical properties found in this state. Additionally, the study of this steel was compared against the behavior of commercial steels widely used in the AISI 1020 and 304L industry to compare corrosion resistance against these. By scanning electron microscopy (SEM) and x-ray-emitted photoelectron

spectroscopy (XPS), the corroded surfaces under study electrolytes were studied, to determine the behavior of the passive layer in front of them, as well as the role played by each one of the elements in the process.

Finally, it was possible to determine the effect of the aluminum content against these corrosion processes, in which for acidic media (H_2SO_4 and HCl), the passive capacity of the layer decreases markedly, facilitating corrosion and generating high values of corrosion density compared to AISI 1020 and 304L steels. On the other hand, the behavior of aluminum in the corrosion of basic media ($NaOH$ and $NaCl$) generates low values of corrosion density as the content of Al increases.

3. Síntesis del proyecto:

La corrosión es una problemática a nivel mundial que amenaza la integridad física de todas aquellas estructuras, herramientas y maquinaria que son construidas en su totalidad o parcialmente con materiales metálicos como parte de sus principales componentes. En tal virtud, la demanda por desarrollar nuevas aleaciones de bajo costo, excelente resistencia mecánica y elevada resistencia a la corrosión son el objetivo de numerosos investigadores e institutos de innovación y desarrollo de nuevos materiales.

Actualmente las aleaciones comúnmente aplicadas en ambientes corrosivos, son los aceros inoxidables, aleaciones al níquel y aleaciones de aluminio, entre otros. Aleaciones que, por los elementos constituyentes, poseen un elevado costo en el mercado. Como posible solución integra e innovadora surgen los aceros Fe-Mn-Al-C, aleaciones que han demostrado tener mejores propiedades mecánicas que los aceros inoxidables y otras aleaciones comúnmente empleadas en aplicaciones donde la corrosión es el principal autor que afecta la integridad física y mecánica de piezas.

Para lograr los propósitos de esta investigación se plantean los siguiente objetivos generales y específicos:

Objetivo general

Determinar el efecto del contenido de aluminio en la resistencia a la corrosión electroquímica del sistema de aleaciones Fe-20Mn-xAl-0.88C-1.5Si-0.4Cu ($x=0, 3, 6$ y 9) y comparar su resistencia a la corrosión con aceros inoxidables comerciales.

Objetivos específicos

- ✓ Obtener las aleaciones del sistema Fe-20Mn-xAl-0.88C-1.5Si-0.4Cu a partir de ferroaleaciones y chatarra mediante el proceso de fundición en horno de inducción.
- ✓ Evaluar el efecto del contenido de aluminio para el sistema en mención en medio básico (1M $NaOH$), ácido (1M H_2SO_4) y salino ($NaCl$ al 3,5%).

- ✓ Evaluar en medio básico (1M NaOH), ácido (1M H₂SO₄) y salino (NaCl al 3,5%) aleaciones inoxidables comerciales para su comparación con los aceros Fe-Mn-Al-C.
- ✓ Determinar la microestructura y tipo de óxidos de las aleaciones mediante difracción de rayos x, microscopía óptica y electrónica de barrido, espectroscopia fotoelectrónica de rayos x y espectroscopia Auger.

Para el desarrollo de los objetivos se realizaron las fundiciones de los aceros Fe-Mn-Al-C en el horno de inducción partiendo de ferroaleación disponibles en el mercado nacional, chatarra de acero AISI 1020 y 1045 y aluminio y cobre de alta pureza. Las ferroaleaciones empleadas para el desarrollo de estas aleaciones fueron ferro manganeso de alto y bajo carbón, ferro molibdeno y ferro silicio. Posteriormente estos aceros fueron caracterizados químicamente por medio de fluorescencia de rayos-x (FRX) y espectroscopia de emisión óptica (OES) y físicamente mediante difracción de rayos-x (DRX) y espectroscopia Mössbauer (EM). Seguido a esto, los aceros fueron tratados termo mecánicamente con el propósito de obtener una estructura de grano equiaxiales en el menor tiempo posible. Esta condición microestructural se caracteriza por ser la óptima para ser usada en aplicaciones de ingeniería. En la Figura 1, se presenta la metodología empleada para realizar el tratamiento termo mecánico.

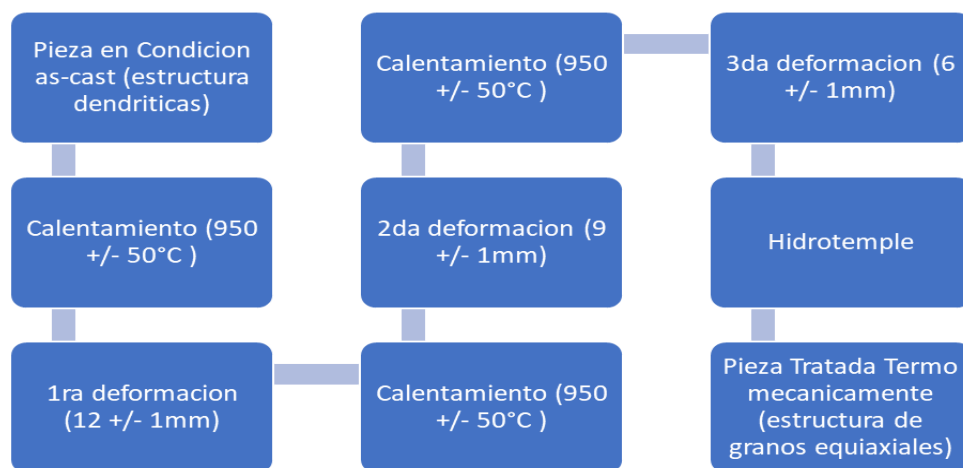


Figura 1. Metodología usada para realizar los tratamientos termo mecánicamente.

Seguido a estos tratamientos termo mecánicos, las muestras fueron analizadas mediante difracción de rayos-x, espectroscopia Mössbauer y difracción de electrones retro dispersados para estudiar el efecto de los tratamientos termo mecánicos en la microestructura. Finalmente, en la condición de granos equiaxiales se realizaron los ensayos electro químicos de resistencia a la polarización lineal, para determinar la densidad de corrosión frente a los siguientes medios corrosivos más usados para este tipo de caracterización. Ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄), cloruro de sodio

al 3,5% en peso (NaCl) e hidróxido de sodio (NaOH). Las concentraciones de estas soluciones, a excepción del NaCl, fueron de para el HCl y NaOH 0,1N y para el H₂SO₄ 1N. Para realizar los ensayos electroquímicos se empleo un potencial +/- 200 mV alrededor del potencial de circuito abierto, con un paso de potencial de 0,15 mV y tasa de escaneo 0,16 mV/s, la preparación de la muestra es acorde a lo especificado en la norma ASTM G5. El contra electrodo empleado para los ensayos fue de platino puro (Pt) y el electrodo de referencia fue de plata cloruro de plata (Ag/AgCl) y por último para la determinación de la densidad de corrosión se empleó la norma ASTM G59. Después de los ensayos electro químicos las superficies corroídas fueron analizadas mediante microscopia electrónica de barrido y espectroscopia de fotoelectrones de rayos de rayos-x. El análisis por microscopia electrónica de barrido se realizó en la condición de electrones secundarios, modo comúnmente empleado en el análisis de superficies, con el cual se facilita determinar los mecanismos de corrosión al nivel superficial y la morfología del ataque.

A continuación, en la Tabla 1 se presentan los resultados de la composición química, en esta se presentan los resultados de las técnicas FRX y OES. El uso de 2 técnicas para análisis química, es debido a que la OES mide la cantidad del carbono, a diferencia del FRX, por otro lado, cuando el Mn es muy alto la OES tiene limitaciones en esta medición, a diferencia de la FRX que no las tiene.

Tabla 1. Resultados de análisis química de las muestras bajo estudio.

		<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Al</i>	<i>Mo</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>C</i>
<i>20Mn0Al</i>	FRX	76,75	18,96	0,00	1,71	1,80	0,47	-
	OES	75,00	-	0,01	1,56	1,44	0,57	0,84
<i>20Mn3Al</i>	FRX	74,48	18,03	3,05	1,77	1,90	0,45	-
	OES	72,57	19,07	-	1,69	1,61	0,55	0,72
<i>20Mn6Al</i>	FRX	71,73	18,07	6,18	1,48	1,76	0,46	-
	OES	68,97	-	-	1,56	1,45	0,58	0,64
<i>20Mn9Al</i>	FRX	67,96	17,74	9,69	1,74	2,14	0,46	-
	OES	66,30	18,57	-	1,99	1,44	0,53	0,75

De estos datos se concluye que las muestras preparadas tienen una estequiometría cercana a la que se pesó inicialmente, mostrando la confiabilidad del horno utilizado.

En la Figura 2 se presentan la caracterización mediante DRX de las muestras fundidas (izquierda) y tratadas termo mecánicamente (derecha). En todas ellas se observan la secuencia de picos de la fase austenítica (FCC) y en aquellas con mayor contenido de Al (9 % at. Al) existen picos adicionales que corresponden a la fase ferrítica (BCC). Para la fase austenítica de las muestras ascast los picos aparecen aproximadamente en $2\theta = 44, 50$ y 74° , mientras que para las muestras tratadas termo mecánicamente estos

picos aparecen aproximadamente en 46° , 58° y 88° , mostrando que la red cristalina se comprime con el tratamiento.

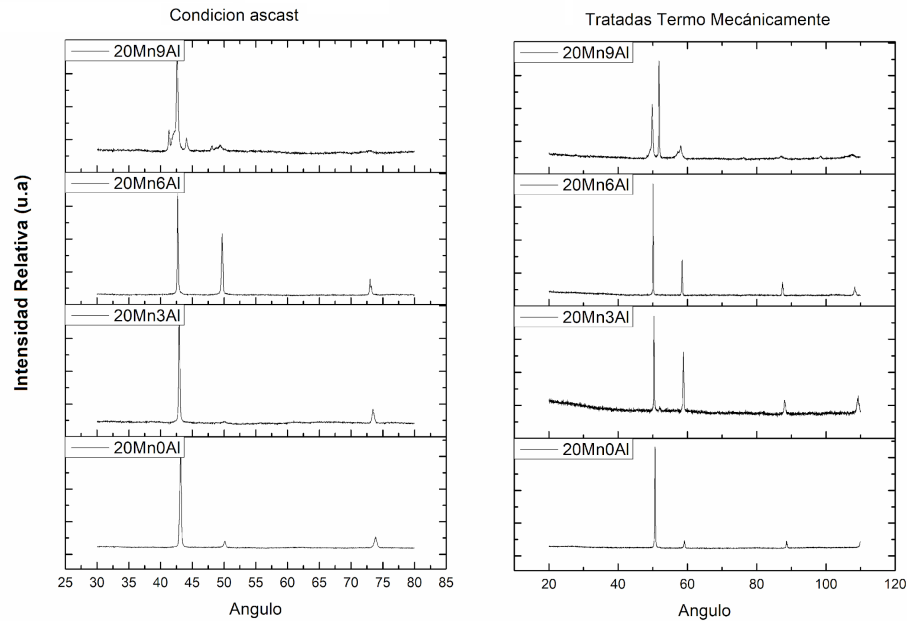


Figura 2. Difractogramas de las muestras en la condición ascast y en la condición tratadas termo mecánicamente.

En la Figura 3 se observan los resultados del EBSD de las muestras tratadas termo mecánicamente. En estas se refleja una estructura de granos equiaxiales, la cual es la ideal para aplicaciones ingenieriles. Se observa además que el tamaño de grano se refina con el aumento del contenido de Al.

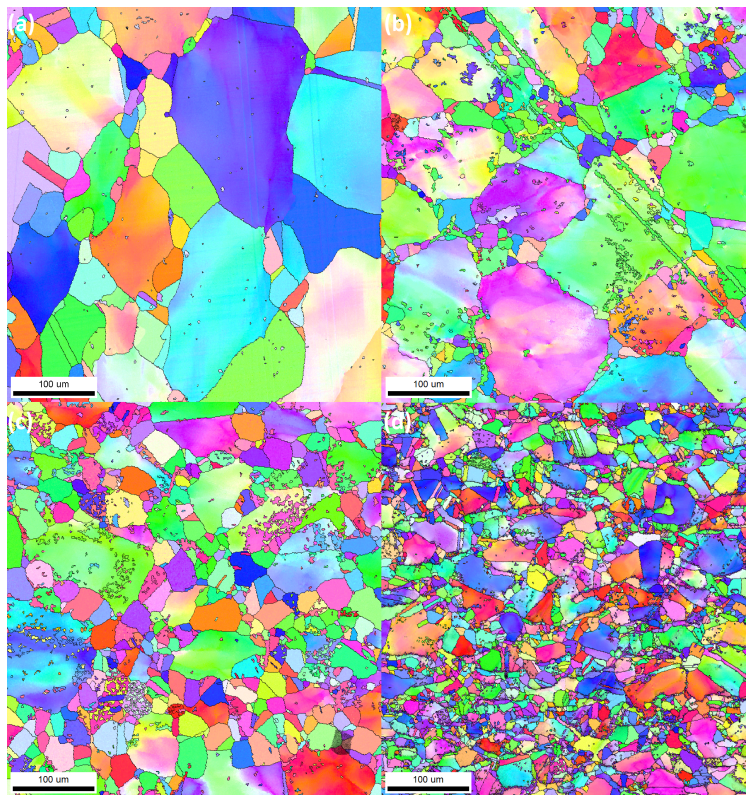


Ilustración 3. EBSD de las muestras tratadas termo mecánicamente. (a) 20Mn0Al, (b) 20Mn3Al, (c) 20Mn6Al y (d) 20Mn9Al

En la Figura 4 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la polarización lineal a los medios ácidos: HCl y H₂SO₄ y medios básicos: NaCl 3,5% y NaOH.

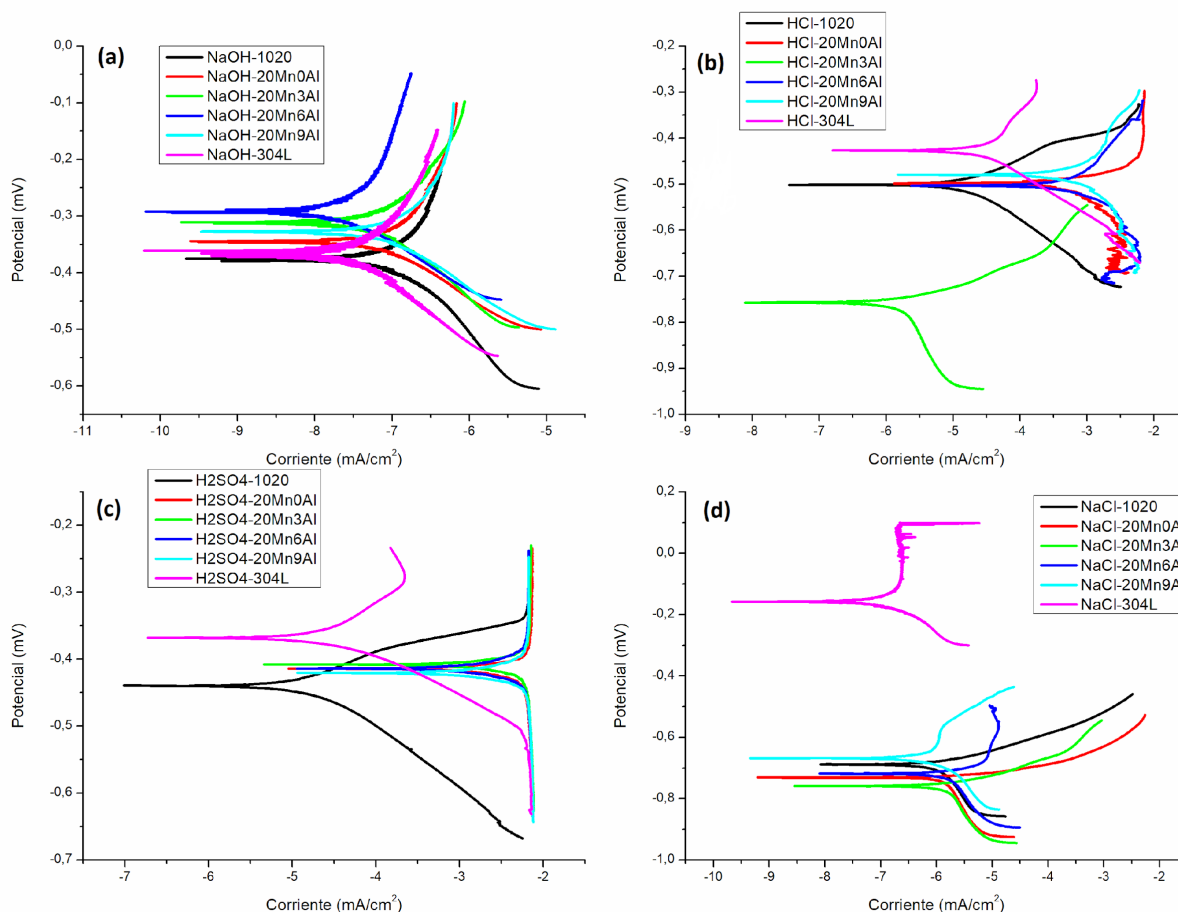


Figura 4. Resultados de ensayos a la resistencia a la polarización lineal en muestras Fe-Mn-Al-C comparada frente a los aceros AISI 1020 y 304L. (a) Corresponde al medio básico NaOH, (b) al medio ácido de HCl, (c) al medio ácido de H₂SO₄ y (d) al medio básico de NaCl.

De los resultados obtenidos por el ensayo electroquímico de la resistencia a la polarización lineal, se logra concluir que existe un efecto beneficioso en el aumento del contenido de aluminio en este sistema de aleaciones. Aunque, por la naturaleza de la capa nativa de óxido de este sistema de aleaciones, este presenta mejor comportamiento a medios básicos como el NaOH y NaCl, en comparación a los medios básicos HCl y H₂SO₄. Finalmente, algo que se logra resaltar y denota gran importancia, es el comportamiento frente al NaOH en comparación a los aceros AISI 1020 y 304L, ya que las resistencias a la corrosión de los aceros Fermanal son muy próximas a los de los aceros comerciales. La investigación de esta familia de aleaciones variando otro importante elemento de aleación de estos sistemas, como lo es el manganeso, podría presentar una mejora a la corrosión en medios ácidos o básicos, logrando encontrar una gran alternativa de reemplazo a los aceros inoxidable por los aceros de bajo costo Fe-Mn-Al-C.

F-04-MP-06-02-02

Elaborado por: Vicerrectoría de Investigaciones

V-03-2016

4. Impactos actual o potencial:

La investigación de estas aleaciones permitirá a los fabricantes de piezas y/o componentes mecánicos de los sectores siderúrgico, transporte marítimo, metalmecánico, entre otros, tener un material alternativo a los aceros inoxidables a un bajo costo y con una mayor vida útil.

Haga una descripción y/o relacione los impactos que tenga el proyecto en los diferentes ámbitos:

Académico:

Durante la realización del presente proyecto se logró formar una estudiante de pregrado (Marcela Barona) y actualmente el estudiante Sebastián Rodríguez, se encuentra terminando su tesis de maestría.

Investigativo: Resultados de este proyecto han sido presentados en Santiago de Chile, en noviembre del 2018, durante la realización del Latin American Conference on Applications of the Mössbauer Effect (LACAME 2018), donde los estudiantes Barona y Rodríguez se presentaron dos trabajos. Uno de ellos se sometió a publicación en la revista Metallurgical and Materials Transactions A (ver PDF anexo). Otro artículo está actualmente en redacción. Se está actualmente preparando un poster para ser presentado en un evento nacional.

Desarrollos futuros

Si posee información acerca de los impactos actuales o potenciales de la investigación, preséntela en máximo una página. Se refiere a los aportes que ofrece en el campo de investigación al que corresponde. Incluye las tecnologías y resultados de IDi que puedan transferirse a los sectores productivos y de servicios, tanto nacionales como internacionales.

5. Productos:

Tabla No. 1. **Cantidad y tipo de productos pactados en el Acta de Trabajo y Compromiso y productos finalmente presentados**

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS	No. de PRODUCTOS PRESENTADOS
Productos de nuevos conocimientos		

Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
	2							
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados								
• Prototipos y patentes								
• Software								
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial								
Normas basadas en resultados de investigación								
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados		No. de tesis		No. De estudiantes Vinculados		No. De tesis	
Estudiantes de pregrado	1		1		1		1	
Semillero de Investigación								
Estudiantes de maestría	1				1			
Estudiantes de doctorado								
Joven investigador								
Productos de divulgación								
Publicaciones en revistas no indexadas								

Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
Propuesta de investigación	1	2	0	2
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.				

Tabla No. 2. Detalle de productos

Para cada uno de los productos obtenidos y relacionados en la tabla anterior, indique la información solicitada para cada uno, anexando copia de las respectivas constancias. Como anexo a este formato encontrará el instructivo para instructivo para la revisión de informes finales y productos

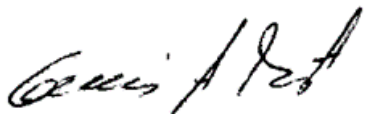
La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Metallurgical and Materials Transactions A. Sometido.
Nombre Particular:	Aceros Fermanal
Ciudad y fechas:	Sometido el 1 de agosto.
Participantes:	G. M. Barona Osorio, G. A. Pérez Alcázar, O. A. Zambrano.
Sitio de información:	Una vez publicado se podrá consultar en la revista y en la Biblioteca Central.

Tipo de producto:	Presentación de resultados
Nombre General:	XVI Latin American Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (LACAME 2018)
Nombre Particular:	Study of the Aging Effect on the Structural, Microhardness Properties and Corrosion Resistance in Saline Solution of a Fe-28.60Mn-5.63Al-0.86C-0.43Cu-1.81Mo-1.59 Si-0.60W Alloy
Ciudad y fechas:	Santiago – Chile. Octubre 3, 2018.

Participantes:	G. M. Barona Osorio, G. A. Pérez Alcázar, O. A. Zambrano.
Sitio de información:	Memorias del congreso y archivos personales de los autores. (Ver anexo)

Tipo de producto:	Presentación de resultados
Nombre General:	XVI Latin American Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (LACAME 2018)
Nombre Particular:	Microstructural evolution of Fe-Mn-Al-C steels during hot processing
Ciudad y fechas:	Santiago – Chile. Octubre 3, 2018.
Participantes:	Juan Rodríguez, John Duran, German Pérez Alcázar and Oscar Zambrano.
Sitio de información:	Memorias del congreso y archivos personales de los autores. (Ver anexo)



Firma del investigador principal



VoBo. Vicedecano de Investigaciones

Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11, con espacios de 1 1/2