



**DISEÑO DE UN ACERO MICROALEADO AL BORO PARA USO EN DIENTES  
DE EXCAVADORA OBTENIDOS POR MOLDEO**

**JORGE LUIS ORTA OROZCO  
ARTURO ENRIQUE DURANTE**

**Tesis de grado presentada como requisito para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**DIRECTOR  
PhD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ**

**CO-DIRECTOR  
MSc. ADRIANA CASTRO VARGAS**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. & C.**

**2017**

**Cartagena D. T. y C., 17 de febrero 2017**

Señores

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

Facultad de Ingeniería Mecánica

Comité Evaluador de Trabajos de Grado

Cordial Saludo.

El objeto de la presente tiene como finalidad someter a su consideración la tesis titulada **“DISEÑO DE UN ACERO MICROALEADO AL BORO PARA USO EN DIENTES DE EXCAVADORA OBTENIDOS POR MOLDEO”**, de los investigadores JORGE LUIS ORTA OROZCO y ARTURO ENRIQUE DURANTE COTES, para optar por el título de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

---

JORGE LUIS ORTA OROZCO

CC 1.026.266.655

---

ARTURO ENRIQUE DURANTE COTES

CC 1.047.475.791

**Cartagena D. T. y C., 17 de febrero de 2017**

Señores

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

Facultad de Ingeniería Mecánica

Comité Evaluador de Trabajos de Grado

Cordial Saludo.

El objeto de la presente tiene como finalidad someter a su consideración la tesis titulada “**DISEÑO DE UN ACERO MICROALEADO AL BORO PARA USO EN DIENTES DE EXCAVADORA OBTENIDOS POR MOLDEO**”, de los investigadores JORGE LUIS ORTA OROZCO y ARTURO ENRIQUE DURANTE COTES, en el que me desempeño como director.

Cordialmente,

---

**MSc. ADRIANA CASTRO VARGAS**

CODIRECTOR DE TESIS.

Nosotros, JORGE LUIS ORTA OROZCO y ARTURO ENRIQUE DURANTE COTES, mayores de edad y domiciliados en la ciudad de Cartagena D. T. y C. e identificados como aparece al pie de este documento, de manera libre y espontánea, manifestamos nuestra voluntad de ceder a la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR** los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado “**DISEÑO DE UN ACERO MICROALEADO AL BORO PARA USO EN DIENTES DE EXCAVADORA OBTENIDOS POR MOLDEO**”, producto de nuestra actividad académica para optar al título de **INGENIERO MECÁNICO** de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la ley 23 de 1982. Con todo, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En concordancia suscribimos este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entregamos al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Dado en la ciudad de Cartagena de Indias D. T. y C., a los 17 días del mes de febrero 2017.

---

JORGE LUIS ORTA OROZCO  
CC 1.026.266.655

---

ARTURO ENRIQUE DURANTE COTES  
CC 1.047.475.791



## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Cartagena de Indias D. T. y C., 17 de febrero 2017



## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos a:

**PhD. Luis Marcos Castellanos**, por su apoyo incondicional en cada una de las etapas del desarrollo de esta investigación, por su aporte intelectual en la consecución de los objetivos de este trabajo de grado, sus acertadas decisiones cuando se presentaron dificultades en la ejecución de nuestra tesis y por sus consejos valiosos que estarán presentes en nuestra vida de Ingenieros.

Al cuerpo docente de nuestra Universidad Tecnológica de Bolívar que de forma directa e indirecta colaboraron en la ejecución de nuestra investigación y que permitieron dar cumplimiento a cada uno de los objetivos de nuestra Tesis.

A la empresa **MAQUINZA SAS** en mano de su Gerente José Pacheco, a la **FERRETERIA IGNACIO SIERRA** especialmente a su gerente German Spicker y a **ACERÍA PROCOMETAL** y a su gerente Orlando Avendaño por su apoyo incondicional, su paciencia y profesionalismo que brindaron en toda la etapa de ejecución de nuestro proyecto de grado.



---

## 1 TABLA DE CONTENIDO

<b>2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>9</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
4.1 Objetivo general .....	10
4.2 Objetivos específicos.....	10
<b>5. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>11</b>
5.1 Propiedades Mecánicas de los Dientes de Excavadoras.....	13
5.2 Materiales para Dientes de Excavadora.....	15
5.3 Aceros Especiales para Dientes .....	16
5.4 Aceros Micro aleados .....	16
5.5 Efectos del Boro en la Microestructura y Propiedades de los Aceros.....	18
5.6 Factores que Influyen Sobre el efecto del Boro en los Aceros.....	21
5.7 Caracterización de los suelos donde operan los dientes de excavadoras .....	22
<b>6. METODOLOGÍA .....</b>	<b>24</b>
<b>7. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>27</b>
7.1 Diseñar una aleación para dientes de excavadora en acero microaleado al boro que presente una mejor resistencia al desgaste que los importados por Colombia.....	27
7.2 Implementar tratamientos térmicos de temple y revenido en las aleaciones diseñadas para mejorar la resistencia al desgaste, tenacidad y dureza.....	32
7.3 Comparar el comportamiento en servicio de los dientes de acero micro aleado al boro respecto a los dientes convencionales importados por Colombia. ....	36
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>48</b>
<b>11. ANEXOS .....</b>	<b>50</b>



## TABLAS DE FIGURAS

FIGURA 1 PARTES PRINCIPALES DE UNA EXCAVADORA EN: <a href="HTTP://ES.SLIDESHARE.NET/AUCCAYLLA/CURSO-INSTRUCCIONOPERACIONEXCAVADORAHIIDRAULICA345CLCATERPILLARFERREYROS">HTTP://ES.SLIDESHARE.NET/AUCCAYLLA/CURSO- INSTRUCCIONOPERACIONEXCAVADORAHIIDRAULICA345CLCATERPILLARFERREYROS</a> .....	12
FIGURA 2 DIENTES DE EXCAVADORA PARA DIFERENTES TRABAJOS, EN <a href="WWW.DIMASUR.MX">WWW.DIMASUR.MX</a> .....	13
FIGURA 3 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN; LA TENACIDAD ES EL ÁREA DEBAJO DE TODA LA CURVA (RICHARD G.& BUDYNAS, J. K, 2015).....	14
FIGURA 4 DIENTE DE UNA RETROEXCAVADORA: (A) NUEVO, (B) CON DESGASTE ABRASIVO SOBRE LA CARA TRASERA SUAVE, (C) CON DESGASTE ABRASIVO SOBRE LA CARA FRONTAL DURA. (D.J. WULPI, 1990).....	15
FIGURA 5 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE UN DIENTE DE EXCAVADORA, ACERO GRADO 4140. (GARCÍA, G., CASANOVA, H., ARAQUE, P., & TORO, A, 2006). .....	16
FIGURA 6 CLASIFICACIÓN DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO DE FASE BINARIO DEL HIERRO: A) FASE $\Gamma$ -ABIERTA, B) FASE $\Gamma$ -EXPANDIDA, C) FASE $\Gamma$ -CERRADA Y D) FASE $\Gamma$ -CONTRAÍDA. (MEHRAN MAALEKIAN, 2007).....	17
FIGURA 7 EFECTO DEL BORO SOBRE LA CURVA TTT DE LOS ACEROS. (WILLIAM ,1991).....	19
FIGURA 8 EFECTO DEL BORO SOBRE LA RESISTENCIA AL IMPACTO A 25°C (GHALI ET AL.; 2012)..	20
FIGURA 9 A) DIAGRAMA TERNARIO BORO – HIERRO – CARBONO A 1000°C, B) DIAGRAMA TERNARIO BORO – HIERRO – CARBONO A 900°C. (ASM INTERNATIONAL, 1992).....	20
FIGURA 10 EFECTO DEL BORO EN LA TEMPLABILIDAD DE LOS ACEROS VS CONTENIDO DE CARBONO (KAPADIA, 1977). .....	21
FIGURA 11 METODOLOGÍA DEL PROYECTO. ....	24
FIGURA 12 MICROGRAFÍA MUESTRA M SIN ATAQUE QUÍMICO 100X (IZQUIERDA), CON ATAQUE QUÍMICO 500X (DERECHA).....	29
FIGURA 13 MICROGRAFÍA MUESTRA J, SIN ATAQUE QUÍMICO 50X .....	29
FIGURA 14. CURVA DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	33
FIGURA 15 TRATAMIENTO TÉRMICO A 300°C DURANTE 20 MINUTOS .....	33
FIGURA 16 ENFRIAMIENTO A TEMPERATURA AMBIENTE.....	34
FIGURA 17. PREPARACIÓN DE DIENTES PARA REALIZAR EL ENSAYO DE DUREZA Y PENETRACIÓN EN DURÓMETRO.....	34
FIGURA 18. ENSAYO DE DUREZA CON DURÓMETRO PORTÁTIL HM 6561 .....	34
FIGURA 19. PROBETAS PARA ENSAYO DE IMPACTO CHARPY, MUESTRAS A1 Y A2. ....	35
FIGURA 20 MICROGRAFÍAS MUESTRA A1. SIN ATAQUE QUÍMICO 50X (IZQUIERDA). CON ATAQUE QUÍMICO 500X (DERECHA).....	36



FIGURA 21. MICROGRAFÍAS MUESTRA A2. SIN ATAQUE QUÍMICO 50X (IZQUIERDA), CON ATAQUE QUÍMICO 500X (DERECHA).....	36
FIGURA 22. MONTAJE DE LOS DIENTES EN LA EXCAVADORA.....	37
FIGURA 23. CONDICIONES DE LOS DIENTES DESPUÉS DE 7 DÍAS DE OPERACIÓN .....	38
FIGURA 24 COMPARACIÓN DEL DESGASTE ENTRE DIENTES PROTOTIPO Y DIENTES MUESTRA M, DESPUÉS DE 7 DÍAS DE OPERACIÓN.....	38
FIGURA 25 COMPARACIÓN DE LOS DIENTES LATERALES DESPUÉS DE OPERACIÓN .....	39
FIGURA 26 MONTAJE DE LOS DIENTES EN LA EXCAVADORA SUELO ARCILLOSO .....	40
FIGURA 27 COMPARACIÓN DEL DESGASTE DE LOS DIENTES DESPUÉS DE TRABAJAR POR DOS MESES EN LA ZONA BLANDA O ARCILLOSA. ....	41
FIGURA 28 CONVENCION DE LA UBICACION DE LOS DIENTES MUESTRA M Y DIENTES MUESTRA A2 .....	41
FIGURA 29. COMPARACIÓN DEL DESGASTE GENERADO EN CADA DIENTE CON EL MISMO TIEMPO DE OPERACIÓN .....	42
FIGURA 30. GRAFICA %DESGASTE VS TIEMPO EN SUELO DURO, MUESTRA M VS MUESTRA A1.....	44
FIGURA 31. GRAFICA %DESGASTE VS TIEMPO EN SUELO DURO, MUESTRA M VS MUESTRA A2.....	44
FIGURA 32. GRAFICA %DESGASTE VS TIEMPO EN SUELO BLANDO, MUESTRA M VS MUESTRA A1.....	45
FIGURA 33. GRAFICA %DESGASTE VS TIEMPO EN SUELO BLANDO, MUESTRA M VS MUESTRA A1.....	45
FIGURA 34. GRAFICA NUMERO DE CAMBIOS EN OPERACION .....	46
FIGURA 35. RESISTENCIA AL IMPACTO, JOULES. ....	46



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FORMATO DE SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE LAS MUESTRAS .....	26
TABLA 2 ROTULO Y ORIGEN DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS EN CAMPO .....	27
TABLA 3 ESTÁNDAR DE VERIFICACIÓN: BAS 434-1, ARMI IARM 30B GRADO 4140. LABORATORIO UNIVERSIDAD DE ANTIOQUÍA (2015) .....	28
TABLA 4 RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE DUREZA PARA LA MUESTRA M Y LA MUESTRA J.....	28
TABLA 5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO PARA LA MUESTRA M Y LA MUESTRA J....	30
TABLA 6 PROPUESTA DE ALEACIÓN. ....	31
TABLA 7 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE DIENTES PROTOTIPOS (ACERÍA PROCOMETAL, 2015).....	32
TABLA 8 RESULTADO DE DUREZA OBTENIDO EN LOS DIFERENTES TIPOS DE DIENTES. ....	35
TABLA 9 RESULTADO DE TENACIDAD OBTENIDO MEDIANTE ENSAYO CHARPY.....	35
TABLA 10 REGISTRO USADO DURANTE EL ENSAYO EN CAMPO .....	38
TABLA 11 REGISTRO USADO DURANTE EL ENSAYO EN CAMPO EN TERRENOS ARCILLOSOS. ....	40
TABLA 12 REGISTRO DE HORAS TRABAJADAS, MUESTRA A2 Y MUESTRA M.....	42
TABLA 13 COMPORTAMIENTO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DIENTES PRESENTES EN LA INVESTIGACIÓN .....	43



## ANEXOS

ANEXO 1 CARTA DE ACEPTACION DE COLABORACION DE MANQUINZA SAS EN EL PROYECTO ....	50
ANEXO 2 RESULTADO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE MUESTRA M Y MUESTRA J .....	51
ANEXO 3 CARTA DE APROBACIÓN Y SATISFACCIÓN DE MAQUINZA SAS .....	52



---

## 2. INTRODUCCIÓN

Este estudio fue parte de una de las dos fases del proyecto macro “Desarrollo y Fabricación de Dientes para Dragas en Aleaciones Especiales para Optimizar las Operaciones de Dragado en el Mar y en los Ríos” (DIDRA) adelantado por la Universidad Tecnológica de Bolívar y el Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología e Innovación (Colciencias). El proyecto macro, DIDRA tuvo como fin general, encontrar nuevas aleaciones que garantizaran mejoras en las propiedades mecánicas de los dientes de las dragas y excavadoras.

Además, la investigación se fundamentó en resultados encontrados en el proyecto “Caracterización de los Dientes de Draga y Desarrollo de Nuevas Aleaciones” de la autoría de Serrano & Garcés (2013) desarrollado, también como parte del proyecto DIDRA.

El proyecto DIDRA se desarrolló en dos fases. En la primera de las fases obtuvieron prototipos de dientes de acero en aleaciones micro aleadas al titanio – vanadio para ser usados exclusivamente en dragas. Y en la segunda fase (de la cual hizo parte está investigación) probaron prototipos de dientes de acero en aleaciones micro aleadas al Boro para excavadoras.

Una de las razones por las cuales se realizó la segunda fase del proyecto DIDRA, fue la oportunidad para el desarrollo de las pruebas de campo en máquinas excavadora. Ya que, las excavadoras son las máquinas más utilizadas en Colombia en trabajos como, la minería a cielo abierto, la construcción, movimiento de tierra y demoliciones.

Por tanto, esta investigación se propuso desarrollar dientes de excavadora en aleaciones de acero micro aleadas al boro, conformados por el método de moldeo, que presentaran mejores propiedades mecánicas. Y que, a su vez, se convirtieran en un producto colombiano, que pueda ser impulsado y competitivo frente a los dientes tipo importados que se consiguen en el mercado nacional.



---

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El desempeño y la productividad en la mayoría de las canteras de canto rodado ubicadas en el corregimiento de Arroyo de Piedra, están siendo limitados por el rápido desgaste de los dientes de las excavadoras, debido a la alta dureza y abrasividad del material presente en la zona. El costo relacionado con el remplazo de los dientes, no sólo por gastos en repuestos y tiempo de mantenimiento, sino también por la baja productividad, ha planteado una necesidad que es la obtención de dientes de mayor desempeño y competitividad.

El corregimiento de Arroyo de Piedra se encuentra ubicado en el municipio de Luruaco, Costa Caribe de Colombia. Este corregimiento es reconocido desde hace mucho tiempo como el pueblo de donde se extrae una parte importante de canto rodado y piedra caliza, materiales que se transforman en los agregados para la construcción de vías y edificaciones en la región.

En sus inicios en Arroyo de Piedra la extracción se hacía de forma artesanal, las herramientas utilizadas por las personas de allí, eran las palas, masetas (monas), picos y cinceles. Pero, desde hace más de 40 años el uso de máquinas como excavadoras y buldócer industrializó esta actividad.

Debido, a la necesidad de las empresas de construcción y de explotación de continuar con el aprovechamiento de material en canteras, se hace ineludible investigar tipos de dientes de máquinas excavadoras que alcancen mayores rendimientos, que aporten a la viabilidad técnica y económica de dicha actividad



---

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

Desarrollar dientes de excavadora en aleaciones de acero microaleadas al boro, conformados por el método de moldeo, que presenten mejores propiedades mecánicas que los importados por Colombia.

### 4.2 Objetivos específicos

- Diseñar una aleación para dientes de excavadora en acero micro aleado al boro que presente una mejor resistencia al desgaste que los importados por Colombia.
- Implementar los tratamientos térmicos de temple y revenido en las aleaciones diseñadas para mejorar la resistencia al desgaste, tenacidad y dureza.
- Comparar el comportamiento en servicio de los dientes de acero micro aleado al boro respecto a los dientes convencionales importados por Colombia.



---

## 5. ESTADO DEL ARTE

Las excavadoras son aparatos mecánicos de carga y excavación propulsadas por sí mismas, las cuales se movilizan sobre orugas o neumáticos, tienen la capacidad de rotar en su mismo eje 360 grados en ambos sentidos, admitiendo realizar múltiples operaciones. Con el transcurrir del tiempo y el crecimiento de la actividad minera en todo el mundo, las excavadoras han evolucionado de acuerdo con las exigencias del mercado mundial (Costes, 1975)

Las excavadoras han sufrido transformaciones importantes a lo largo de la historia, inicialmente, se trataban de máquinas originadas a partir de la tecnología de las dragas flotantes en el siglo XVIII, quienes posteriormente evolucionaron a las excavadoras de rodete, propulsadas a vapor y montadas sobre pistas ferroviarias, hasta que alcanzaron un funcionamiento hidráulico, con motores de aceites. (Costes, 1975)

Toda la tecnología de las maquinas excavadora fueron desarrolladas en países de Europa y Estados Unidos. Los países de Suramérica han sido dependientes de las importaciones de dichas maquinarias.

Las excavadoras están constituidas por muchos elementos, mecanismos que operan de diferente manera o en otros niveles y que sumados todos estos movimientos permiten que la excavadora sea versátil en los campos de operación.

Los componentes principales de las excavadoras, se pueden observar en la figura 1:



**Figura 1** Partes principales de una excavadora en: <http://es.slideshare.net/auccaylla/curso-instruccionoperacionexcavadorahidraulica345clcaterpillarferreyros>

Los dientes o puntas de los baldes de las excavadoras son la parte de la máquina que más se ven expuestos al desgaste, ya que son sometidos a esfuerzos muy grandes cuando se enfrenta a una combinación de dureza de material, golpes, fuerzas de excavación y factores ambientales. En el entorno de trabajo de las excavadoras, el desgaste es inevitable. (López L& Herrera J, 2013)

El mayor reto es diseñar un tipo de dientes que esté optimizado para resistir las fuerzas y el desgaste. Un diente bien diseñado y con una combinación equilibrada de dos propiedades mecánicas como la dureza y tenacidad en su aleación, puede ofrecer una vida útil óptima y garantiza buena calidad del producto.

Logrando una mayor vida útil de los dientes de los baldes de las excavadoras, se reduce el tiempo fuera de operación que se genera por los cambios de dientes, mejorando la productividad. También, logrando una excelente combinación de dureza y tenacidad en los dientes de las excavadoras, se disminuye el consumo de combustible, un llenado mayor de la cuchara y un desgaste menor de la máquina.

En la figura 2, se muestra los diferentes tipos de dientes existentes para excavadoras, de acuerdo con el tipo de trabajo a realizar:



**Figura 2** Dientes de excavadora para diferentes trabajos, en [www.dimasur.mx](http://www.dimasur.mx)

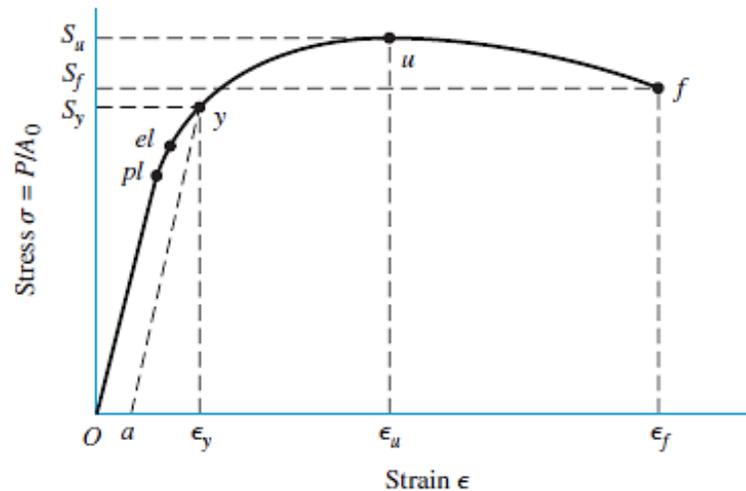
## 5.1 Propiedades Mecánicas de los Dientes de Excavadoras.

Entre las propiedades mecánicas de los dientes de excavadora tenemos: tenacidad, dureza y resistencia a la abrasión.

### 5.1.1 Tenacidad

La tenacidad es la capacidad de un material de absorber energía y deformarse plásticamente sin fracturarse. También puede definirse como la cantidad de energía por unidad de volumen que un material puede absorber antes de romperse (Richard G.& Budynas, J. K, 2015)

A continuación, la gráfica del diagrama de esfuerzo-deformación de la tenacidad tomado de (Richard & Budynas, 2015):



**Figura 3** Diagrama esfuerzo-deformación; la tenacidad es el área debajo de toda la curva (Richard G.& Budynas, J. K, 2015)

Los dientes de una excavadora requieren una alta tenacidad, ya que estos se encuentran sometidos a cargas de impacto, lo que convierte la tenacidad en una propiedad de diseño para la aleación.

### 5.1.2. Dureza

La dureza es una propiedad de los materiales que da noción de la oposición que ofrecen los materiales a ser penetrados. Mientras más duro sea un material, mayor será la resistencia a la deformación localizada de este. La dureza está relacionada con la resistencia a la abrasión, sin embargo, no siempre el material con mayor dureza presenta la mayor resistencia a la abrasión (Norton, 2011).

### 5.1.3. Resistencia a la abrasión

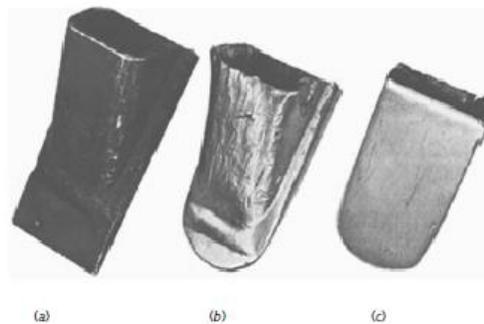
La abrasión entre dos cuerpos se refiere al deslizamiento de un material áspero duro contra uno más blando. La superficie dura escarba en el material más blando y lo remueve. Un ejemplo, es una lima que se utiliza en el contorno de una pieza de metal. (Norton, 2011).



La abrasión entre tres cuerpos se refiere a la introducción de partículas duras entre dos superficies deslizantes, donde por lo menos una de ellas es más blanda que las partículas. Las partículas erosionan material de una o ambas superficies. (Norton, 2011).

Los equipos que remueven tierra, como las excavadoras, niveladoras u otro equipo de minería, operan en abrasión relativamente descontrolada entre tres cuerpos, ya que la excavación de tierra o minerales con frecuencia contiene materiales más duros que la superficie de acero del equipo, como el caso del silicio, que es el segundo elemento más abundante en la tierra, luego del oxígeno; y es más duro que la mayoría de los metales (dureza absoluta de  $800 \text{ kg/mm}^2$ ). (Norton, 2011).

A continuación, una figura que muestra diferentes tipos de desgastes en dientes de excavadoras:



**Figura 4** Diente de una retroexcavadora: (a) nuevo, (b) con desgaste abrasivo sobre la cara trasera suave, (c) con desgaste abrasivo sobre la cara frontal dura. (D.J. Wulpi, 1990)

## 5.2 Materiales para Dientes de Excavadora

Los dientes de excavadora son elementos mecánicos que se encuentran sometidos a cargas de impacto y a desgaste abrasivo, por lo que los materiales para su fabricación deben brindar resistencia a estos parámetros. Por lo general, los dientes son fabricados con un porcentaje medio de carbono, del 0,3 al 0,4 por ciento para brindar resistencia mecánica y tenacidad. Un porcentaje alto de cromo y manganeso puede aumentar la resistencia al desgaste; silicio para reducir el porcentaje de oxígeno de la aleación; vanadio para afinar el tamaño de grano, brindando un aumento en la resistencia mecánica. (Rosario, 2004).



### 5.3 Aceros Especiales para Dientes

Algunas aleaciones de acero son consideradas especiales para la fabricación de dientes para excavadora, debido a sus elementos aleantes, ya que estos mejoran en gran proporción las propiedades al momento de ser empleados. (Rosario, 2004).

Dentro de esta clasificación podemos encontrar aleaciones de aceros de la serie 41xx, 86xx, 31xx y 43xx, con ligeras variaciones en su composición, lo que los convertiría en aceros especiales.

A continuación, una tabla (figura 5) que muestra la composición química de un diente de excavadora en acero grado 4140.

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Al	%Cu	%Pb	%Sn	%Ti	%V
0,403	0,360	0,782	0,014	0,030	0,147	1,259	0,179	0,004	0,245	0,008	0,022	0,001	0,018

**Figura 5** Composición química de un diente de excavadora, acero grado 4140. (García, G., Casanova, H., Araque, P., & Toro, A, 2006).

### 5.4 Aceros Micro aleados

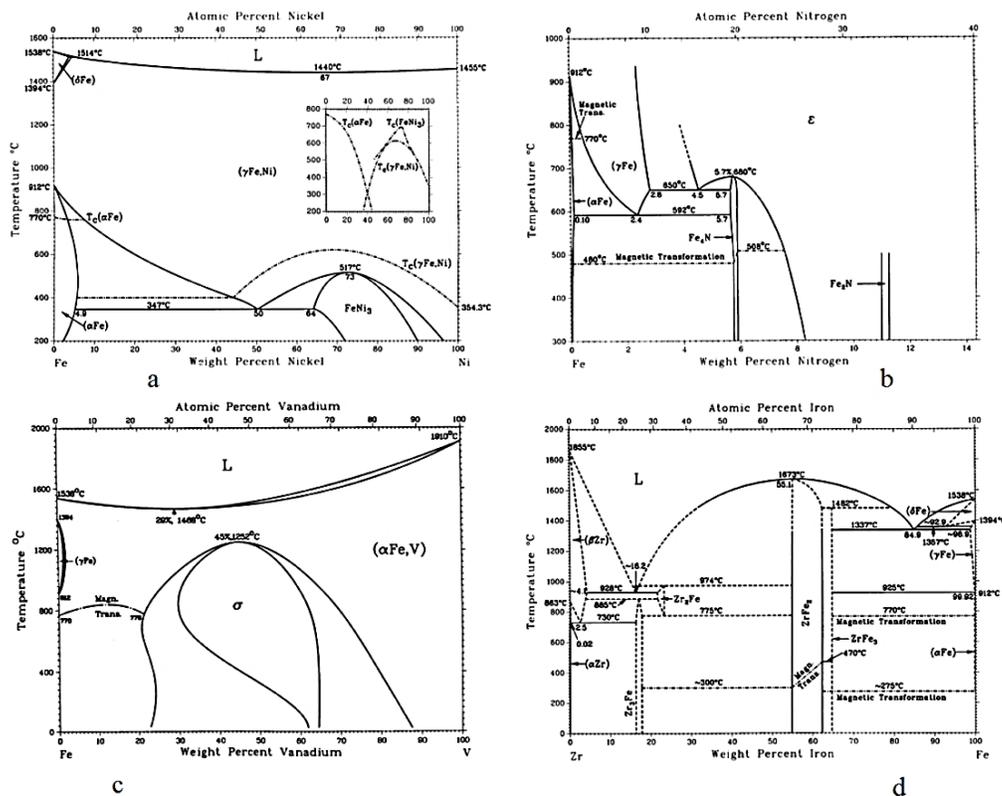
Los aceros con elementos micro aleantes son aleaciones ferrosas constituidas por dos elementos principales, el hierro y el carbono, y por pequeñas cantidades de uno o más elementos como el Vanadio (V), Boro (B), Niobio (Nb) o Titanio (Ti), conocidos como elementos micro aleantes. Cada elemento microaleante modifica de una manera concreta las propiedades básicas de los aceros, con lo cual, combinándolos adecuadamente y sometiendo el acero a un tratamiento térmico o termo mecánico se pueden fabricar aceros con un excelente balance de resistencia a la tensión, tenacidad, ductilidad y soldabilidad. Éstos elementos micro aleantes forman estructuras junto con el carbono y el nitrógeno que alteran las relaciones entre las fases, la microestructura y, por ende, las propiedades de los aceros. Estos elementos micro aleantes se pueden clasificar en cuatro tipos de sistemas debido a las características de la transformación que generan en los sistemas de equilibrio binarios del hierro, como: fase  $\gamma$ -abierta, fase  $\gamma$ -cerrada, fase  $\gamma$ -expandida y fase  $\gamma$ -contraída. (Maalekian, 2007).



De acuerdo con el anterior autor Maalekian (2007), los cuatro tipos de sistemas indican que los elementos micro aleantes influyen de dos formas sobre los diagramas de equilibrio:

- Expandiendo la fase  $\gamma$ : al expandir la fase  $\gamma$ , se fomenta la formación de austenita sobre los límites de la composición. A estos elementos se les llama  $\gamma$ -estabilizadores.
- Contrayendo la fase  $\gamma$ : al contraer la fase  $\gamma$ , se fomenta la formación de ferrita sobre los límites de la composición. A estos elementos se les llama  $\alpha$ -estabilizadores.

A continuación, en la figura 6 se muestra la clasificación de diagramas de fase de hierro.



**Figura 6** Clasificación diagramas de equilibrio de fase binario del Hierro: a) fase  $\gamma$ -abierta, b) fase  $\gamma$ -expandida, c) fase  $\gamma$ -cerrada y d) fase  $\gamma$ -contraída. (Maalekian, 2007)



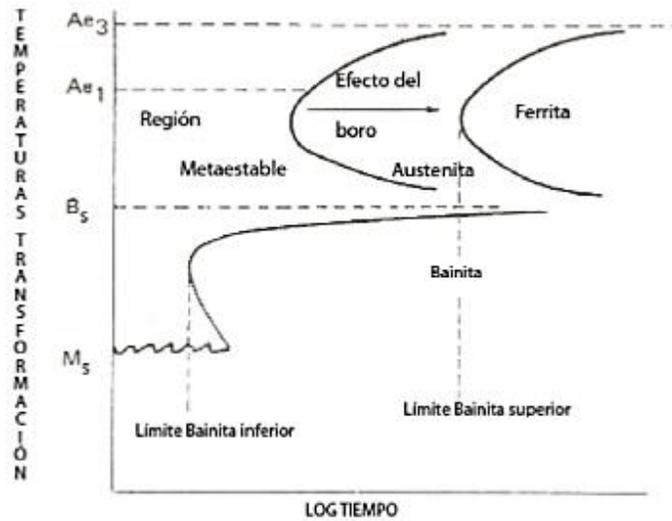
## **5.5 Efectos del Boro en la Microestructura y Propiedades de los Aceros**

El boro como elemento de aleación tiene efectos benéficos que mejoran el acero. Esta aleación es una de las más económicas para mejorar sus propiedades. El principal efecto del boro es la inhibición de la formación de ferrita en el límite de grano de la austenita, al limitar la movilidad atómica, facilitando la formación de bainita y martensita, teniendo como resultado un aumento de la templabilidad del acero. Además, el boro se desplaza hacia los límites de grano de la austenita, donde forma precipitados que producen un aumento de la dureza. (Sierra, 2001).

En la década del 70 se estableció con precisión que el efecto del boro en la templabilidad está asociado a la precipitación al límite de grano de partículas muy finas de un constituyente identificado como borocarburo  $\{Fe_{23}(CB)_6\}$  (Sierra, 2001).

De igual forma, se estableció que cuando el precipitado es muy fino, éste presenta una intercarra semicoherente con la austenita que es (cubica centrada en las caras) y en esta intercarra se inhibe la formación de ferrita (que es cubica centrada en el cuerpo) al bajar considerablemente la movilidad atómica y, en consecuencia, se propicia la transformación martensítica. (Sierra, 2001).

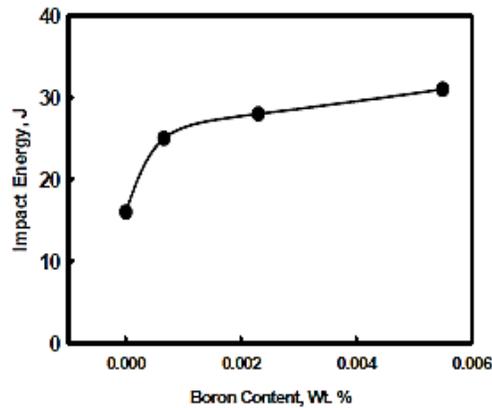
La formación de bainita y martensita se explica porque el boro desplaza la nariz de la curva TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) hacia la derecha (como se observa en la Fig. 7), permitiendo obtener estructuras bainíticas y martensíticas para un rango mucho mayor de temperaturas de enfriamiento, mejorando la templabilidad del material (William, 1991). (Sierra, 2001).



**Figura 7** Efecto del boro sobre la curva TTT de los aceros. (William ,1991).

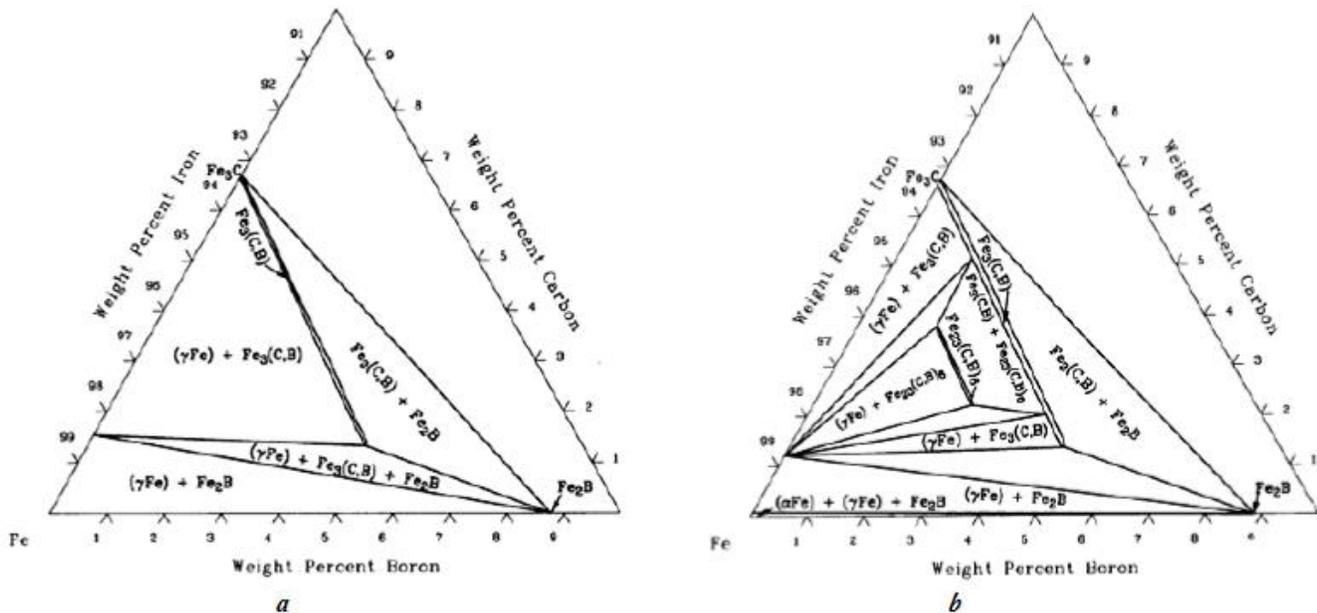
Por otro lado, un aumento en el contenido de boro del acero implica una disminución de la cantidad de ferrita presente en la microestructura del acero. La inhibición de la formación de ferrita viene dada por la presencia de carburos de boro en el límite de grano de la austenita, colocándose éstos en los sitios preferenciales para la formación de ferrita. El boro segrega hasta los límites de grano de la austenita, dando lugar a un aumento de la dureza, debido a la formación de fases solidas en los límites de grano, además esta segregación ayuda a mejorar la tenacidad de la aleación, mientras el boro se encuentre en el rango permisible (Salas, 2006).

En la figura 8, se muestra cómo se comporta el efecto del boro sobre la resistencia al impacto a 25° C.



**Figura 8** Efecto del boro sobre la resistencia al impacto a 25°C (Ghali et al.; 2012).

Tal como sucede con el carbono, el boro es soluble sólo en escala atómica en la red del hierro. Para una temperatura de 1000°C se observa que puede formar compuestos con el carbono y el hierro, obteniéndose  $Fe_2B$ ,  $Fe_3(C, B)$  mientras que si se disminuye la temperatura hasta unos 900°C se forma un nuevo compuesto,  $Fe_{23}(C, B)$  como se puede apreciar ambas secciones en la Fig. 9. (Salas, 2006).



**Figura 9** a) Diagrama ternario Boro – Hierro – Carbono a 1000°C, b) Diagrama ternario Boro – Hierro – Carbono a 900°C. (ASM International, 1992)



La capacidad de endurecimiento del boro está limitada al porcentaje de carbono que esté presente en la aleación. Grange citado en Kapadia (1977) mostró que el efecto del boro sobre la templabilidad era más marcado para los aceros con un bajo porcentaje de carbono ( $<0.4\%$ ). Para porcentajes superiores a este, se veía reducido el efecto en gran cantidad; entre 0.8 y 1.2% el efecto del boro era nulo y a concentraciones superiores a 1.2% disminuía la templabilidad de la aleación, Tal como se aprecia en la Fig. 10 (Kapadia, 1977).

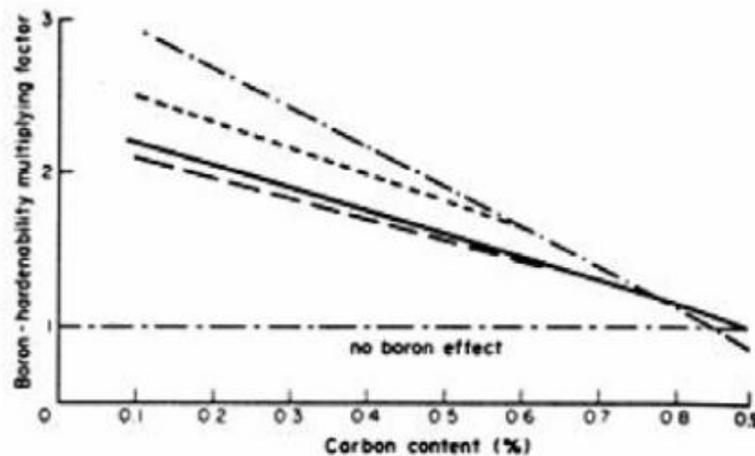


Figura 10 Efecto del boro en la templabilidad de los aceros vs contenido de carbono (Kapadia, 1977).

## 5.6 Factores que Influyen Sobre el efecto del Boro en los Aceros.

Entre los factores que influyen y determinan el comportamiento que tendrá el boro en el acero encontramos, la temperatura de austenización, tamaño de grano de la austenización y el proceso de obtención del acero. (Maalekian, 2007).

### 5.6.1. Temperatura de austenización

El uso de temperaturas de austenización entre 900 – 1095°C, la cual produce una drástica disminución de la templabilidad de los aceros al boro, debido a una excesiva precipitación de compuestos de boro hacia los límites de grano, facilitando así grietas. Este efecto de disminución de templabilidad, se puede revertir si se realiza un calentamiento a temperaturas inferiores a 900°C. Otro efecto de las altas temperaturas de austenización en los aceros microaleados al boro, es conocido como “desaparición del boro,” en donde, al realizar un calentamiento por encima de



los 1075°C se produce una disminución, esta vez irreversible de la templabilidad. (Maalekian, 2007).

### 5.6.2. Tamaño de grano de la austenita

Debido a que los límites de grano de la austenita juegan el papel más importante en la templabilidad de los aceros al boro, el tamaño de grano tiene una doble influencia en la templabilidad de aceros al boro, tanto a través de la cinética de transformación, así como de la distribución del boro en los límites de grano austenítico (Maalekian, 2007).

### 5.6.3. Proceso de obtención del acero

Debido a la afinidad del boro por el oxígeno y el nitrógeno es importante el control de ellos mediante procesos de desoxidación utilizando silicio o aluminio antes de agregar el boro para control del primero, además, de la adición de elementos como titanio y circonio que forman nitruros para control del segundo. Adicionalmente, es necesario el control de otros elementos tales como manganeso y cromo, ya que en contenidos altos producen una pérdida del efecto del boro, incluso para bajos contenidos de carbono, debido a la rápida difusión en la ferrita que posee el cromo y al efecto de aumento de tamaño de grano de la austenita propiciado por el manganeso. (Salas, 2009).

## 5.7 Caracterización de los suelos donde operan los dientes de excavadoras

Ramirez & Moge (2004) clasifican los suelos de la siguiente manera:

**“Clase 1: humus (mantillo):** El humus es la capa superior del suelo que contiene humus y seres vivos, además de materia inorgánica, como por ejemplo mezclas de gravillas, arena, lodo y arcilla.

**Clase 2: suelo pastoso** Tipo de suelo de naturaleza fluida hasta pastosa que mantienen el agua

**Clase 3: suelo de fácil arranque** Arenas no ligeras o levemente ligeras, gravilla y mezclas de arena y gravilla con hasta el 15%(en peso) de lodo y arcilla (tamaño del grano menor de 0,006 mm) y con un máximo de 30% (en peso) de piedras con un tamaño del



---

grano superior a  $0,001\text{m}^3$  de volumen. Tipos de suelos orgánicos con un bajo contenido de agua (por ejemplo, turba compacta)

**Clase 4: suelo de arranque medianamente difícil:** Mezcla de arena, gravilla, lodo y arcilla con un porcentaje de más del 15% (en peso), tamaño del grano menos de 0,06 mm. Tipos de suelos ligados con una plasticidad ligera a media que son blandos hasta semi-compactos según el contenido de agua y que contienen un máximo de 30% (en peso) de piedra con un tamaño del grano superior a 63 mm hasta un volumen de  $0,01\text{m}^3$

**Clase 5: suelo de arranque difícil:** Tipos de suelos según clases 3 y 4, pero un porcentaje superior al 30% (en peso) de piedras con un tamaño del grano de más de 63 mm y un volumen hasta de  $0,01\text{m}^3$ .

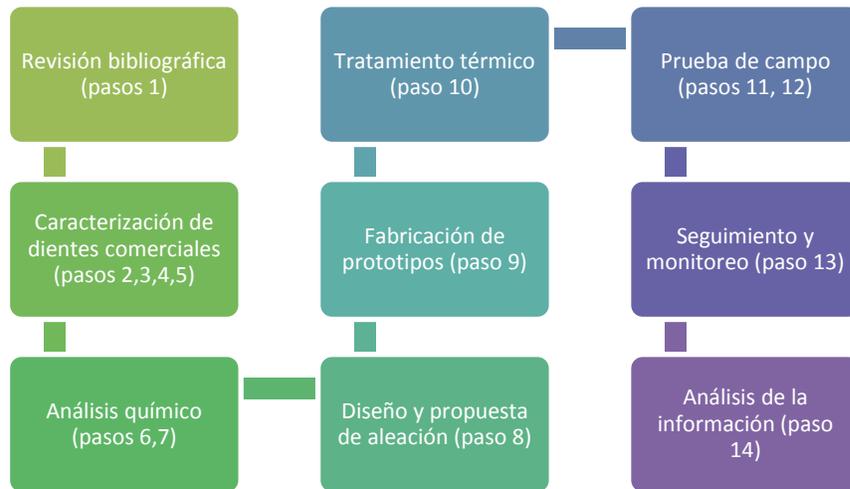
**Clase 6: rocas de fácil arranque y suelos comparables** Tipos de rocas que tienen una cohesión interna, ligera por minerales, pero que son fuertemente fisuradas, quebradizas, pizarrosas, bandas o descompuestas, así como tipos de suelo comparables compactados o compactados no ligados o ligados. Tipos de suelos no ligados o ligados con más de 30% (en peso) de piedras y un volumen superior a  $0,01\text{m}^3$  hasta los  $0,10\text{m}^3$

**Clase 7: rocas de arranque difícil** Tipos de rocas que tienen una cohesión interna ligada por minerales y una alta rigidez estructural y que están poco fisuradas o descompuestas. Pizarra compactada, no descompuesta, capas de conglomerado, escoriales en las plantas metalúrgicas y semejantes. Piedras con un volumen superior a  $0,10\text{m}^3$ ". (Ramirez&Moge, 2004)



## 6. METODOLOGÍA

El diagrama a continuación muestra los pasos mediante los cuales se desarrolló la metodología de la investigación:



**Figura 11** Metodología del proyecto.

La metodología desarrollada en esta investigación tuvo un enfoque experimental, a partir de los resultados obtenidos en el proyecto macro DIDRA fase I.

También, como técnica de desarrollo para la fabricación de los dientes micro-aleados, se utilizó el método del moldeo, conocido también como fundición o colada. Dicho método consiste en verter un material fundido en un molde, y esperar que se endurezca y obtenga la forma deseada.

Para alcanzar la fase experimental fue necesario desarrollar una secuencia de pasos, que se describen a continuación.

### Pasos Metodológicos

1. Revisión bibliográfica en general, pero especialmente de los resultados obtenidos en el macro proyecto DIDRA fase 1.
2. Visitas a empresas: se realizaron visitas a empresas ubicadas en la ciudad de Barranquilla y el corregimiento de Arroyo de Piedra que trabajaran con máquinas excavadoras. A cada una de las



---

empresas se les conto el objetivo del trabajo y se les pregunto si estaban interesadas en participar en el proyecto de investigación.

3. Selección de empresas interesadas en participar: se seleccionaron dos empresas que finalmente se interesaron en el proyecto y estuvieron dispuestas a participar en las pruebas de campo. Una de las empresas seleccionadas en Barranquilla y otra en el corregimiento de Arroyo de Piedra.

4. Identificación de los tipos de dientes usados por las excavadoras de las empresas participantes: mediante entrevistas con los administradores de cada una de las empresas se logró identificar los tipos de dientes y la procedencia (es decir si eran importados o nacionales, y de que países provenían)

5. Caracterización de los dientes de excavadoras aportados por las empresas participantes: después que cada empresa manifiesto su participación por escrito, las empresas entregaron los tipos de dientes de su preferencia, es decir aquellos que le brindan mayores rendimientos. Cada uno de los dientes entregados fueron llevados al laboratorio y analizados. Junto con los dientes, las empresas entregaron registros de campo (los cuales son tomados día a día) para conocer el detalle del rendimiento de los dientes en campo.

6. Análisis químico en espectrómetro de emisión óptica: los dientes entregados por las empresas fueron llevados al laboratorio con el objeto de conocer su composición química elemental.

7. Selección del tipo de dientes a mejorar con la investigación: a partir de la información arrojada del análisis de laboratorio, se identificó y seleccionó el tipo de diente que mayores oportunidades de mejoras presentaron.

8. Diseño de propuesta de aleación: para el tipo de diente que presentó mejor composición química se propuso una nueva aleación, que permitiera mejores rendimientos en términos de dureza y tenacidad.



9. Fabricación de prototipo a partir de la propuesta de aleación: durante este paso, se fabricó un modelo prototipo para ser probado en campo.

10. Tratamiento térmico: los dientes entregados fueron sometidos a tratamiento térmico específicamente revenido para aliviar las tensiones en la microestructura de esta aleación. Este proceso se realizó después de que los prototipos fueron fundidos y templados por una empresa experta en la fabricación de piezas mecánicas.

11. Entrega de los nuevos prototipos de dientes obtenidos en la investigación a las empresas participantes.

12. Prueba en campo de las muestras: los dientes obtenidos en la investigación fueron probados por las máquinas de las empresas. Para colocar los dientes en los baldes de las maquinas, se tuvo en cuenta, ubicarlos de forma estratégica, para que los dientes comerciales y los fabricados en la investigación trabajaran de la misma forma y cumplieran con la misma función durante la operación de la excavadora. Las pruebas de campo se realizaron sobre suelos clasificación 5 (suelos de difícil arranque) o suelos duros, y suelos clasificación 3 (suelos de fácil arranque) o arcillosos.

13. Seguimiento y monitoreo de las muestras durante las pruebas de campo: para realizar el seguimiento y monitoreo se utilizó el siguiente formato:

Fecha	Horas trabajadas

**Tabla 1.** Formato de seguimiento y monitoreo de las muestras

14. Análisis de la información: finalmente se obtuvo los resultados y se procedió al análisis de la información.



## 7. RESULTADOS

### 7.1 Diseñar una aleación para dientes de excavadora en acero microaleado al boro que presente una mejor resistencia al desgaste que los importados por Colombia.

De acuerdo con los pasos mencionados en la metodología de investigación, el diseño de los dientes prototipos surgió después de realizar las visitas, seleccionar las empresas que participarían en el proyecto y caracterizar mediante análisis químico las muestras entregadas. En el Anexo 1 se observa la participación formal de la empresa seleccionada.

Cada empresa participante aportó los dietes que más usaba en las labores realizadas a diario y de los que mejores rendimientos les ofrecía. Los dientes entregados por las empresas, fueron rotulados de la siguiente manera:

Empresa	Ubicación de la empresa	# de dientes aportados	Procedencia del diente	Rotulo asignado en la investigación	Registro fotográfico
Maquinza S.A.S	Barranquilla	2	Importado de Corea	Muestra M	
Roca Caribeña S.A.S	Arroyo de Piedra	2	Importado de China	Muestra J	

**Tabla 2** Rotulo y origen de las muestras recolectadas en campo

Los dientes entregados por las empresas fueron analizados mediante:

- Análisis químico obtenido mediante espectrometría de emisión óptica
- Ensayo de dureza Vickers
- Análisis microestructural realizado mediante microscopia óptica y microscopía electrónica de barrido.
- Ensayo de impacto Charpy



Los resultados arrojados durante la caracterización de las muestras entregadas (Muestra J y Muestra M) se observan a continuación:

a) Resultado de composición química:

Elemento %	Muestra J	Muestra M
Carbono (C)	0,446	0,325
Silicio (Si)	0,415	0,429
Manganeso (Mn)	0,514	1,085
Fosforo (P)	0,019	0,023
Azufre (S)	0,014	0,010
Cromo (Cr)	0,712	1,106
Molibdeno (Mo)	0,111	0,201
Níquel (Ni)	0,096	0,138
Cobre (Cu)	0,028	0,059
Aluminio (Al)	0,065	0,037
Arsénico (As)	0,0050	0,0066
Boro (B)	0,00049	0,00047
Cobalto (Co)	0,0048	0,0095
Antimonio (Sb)	0,0013	0,0027
Niobio (Nb)	0,0039	0,035
Estaño (Sn)	0,0036	0,0056
Titanio (Ti)	0,0013	<0,0010
Plomo (Pb)	0,0020	0,0032
Tungsteno (W)	<0,0020	0,0023
Vanadio (V)	0,0050	0,032
Zinc (Zn)	0,0027	0,0017

**Tabla 3** Estándar de verificación: BAS 434-1, ARMI IARM 30B Grado 4140. Laboratorio Universidad de Antioquía (2015)

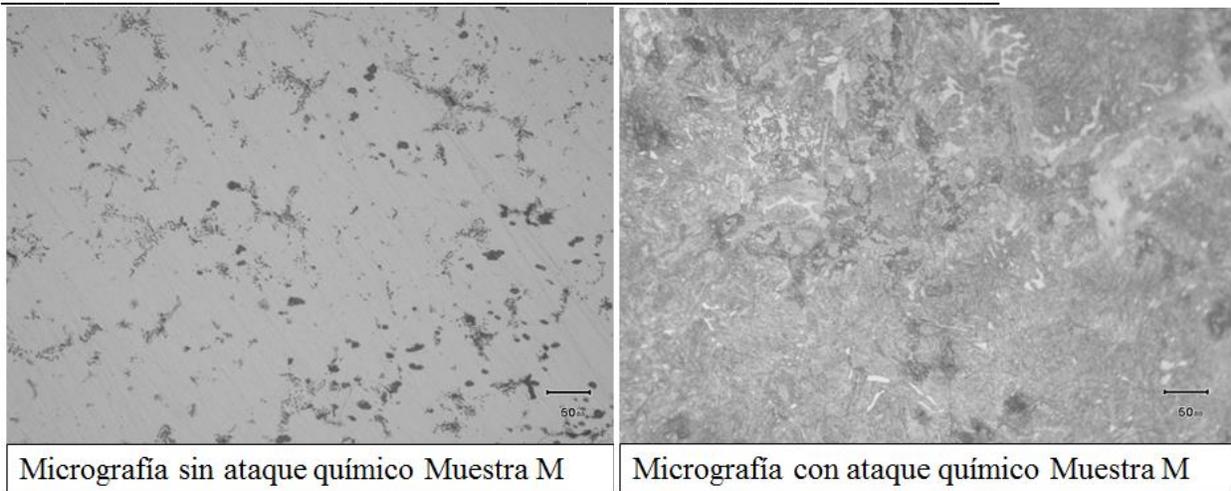
En el Anexo 2 se puede observar los resultados entregados por el laboratorio.

b). Resultado ensayo de dureza Vickers

Método de estudios/dureza	Muestra M	Muestra J
Vickers	445	547
Equivalente HRC	45	52

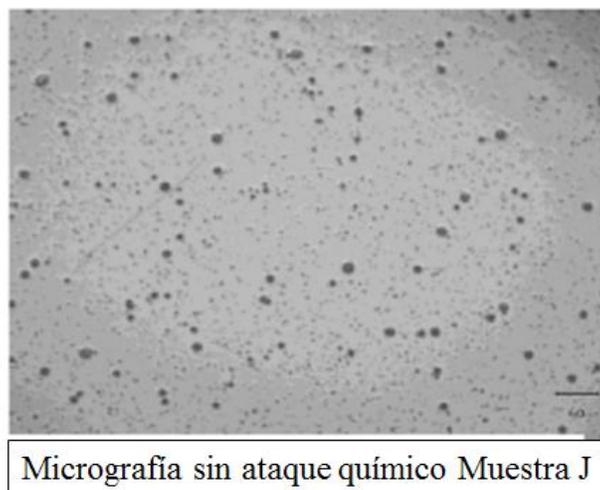
**Tabla 4** Resultado de los ensayos de dureza para la muestra M y la muestra J

c) Resultado de análisis micro-estructural



**Figura 12** Micrografía muestra M sin ataque químico 100X (Izquierda), con ataque químico 500X (Derecha).

Se observa en la Figura 12 algunas inclusiones no-metálicas en la micrografía sin ataque químico, resultado del proceso de fundición. Además se puede apreciar martensita revenida producto de los tratamientos térmicos a los que fue sometido el diente, en la micrografía con ataque químico.



**Figura 13** Micrografía muestra J, sin ataque químico 50X

En la anterior figura 13 se aprecia la gran cantidad de inclusiones no-metálicas y poros que presenta la Muestra J, producto de un mal proceso de manufactura.



d) Resultado de Ensayo de impacto Charpy

Método de estudios/impacto	Muestra M	Muestra J
Tenacidad (Joules)	21	15

**Tabla 5** Resultados de los ensayos de impacto para la muestra M y la muestra J

De acuerdo con los análisis de ensayo químico, ensayos de dureza e impactos y análisis microestructural realizados, mencionamos lo siguiente:

- Ambos aceros (es decir Muestra J y M) son medios en carbono sin presencia específicas de micro aleantes especiales para formar carburos o afinar grano. Además, ambas presentan tratamientos térmicos que ayudan a aumentar su dureza.
- La muestra J presenta mayor dureza que la muestra M debido a que presenta un mayor porcentaje de carbono, sin embargo, la muestra M presenta mejor resistencia al impacto debido a que presenta menor cantidad de inclusiones no-metálicas que las observadas en la muestra J.
- Los dientes de la muestra M contienen menos carbono, más cromo y manganeso (1,106 % de Cr y 1,085 de Mn de acuerdo a los resultados de la composición química), como se aprecia en la figura 12; incrementando su resistencia al desgaste y tenacidad.
- El vanadio como microaleante en el acero de la Muestra M (0,032%) podría contribuir al incremento de la resistencia al desgaste, siempre y cuando sea aportado en las cantidades ideales (0,18 y 0,20) (Sierra, 2001)
- En ambos casos (Muestra J y Muestra M) se observan oportunidades de mejoras, y ofrecer con la nueva aleación un diente de mejor rendimiento que los antes mencionados.

Y, además, de acuerdo con la revisión hecha a los registros de campo entregados por las empresas participantes al inicio de la investigación, los dientes de la Muestra M tienen el doble de rendimiento que los dientes de la Muestra J.



Después de analizar las composiciones químicas, ensayo dureza e impacto y análisis microestructural de las muestras, se propuso, a partir de los resultados del macro proyecto DIDRA fases I y de la revisión bibliográfica expuesta en el estado del arte de esta investigación, una aleación que combinará de la mejor manera el binomio de dureza y tenacidad. Para lograrlo, el grupo de investigación, escogió el elemento B (boro) como micro-aleantes. Ya que, de acuerdo con la revisión señalada, el Boro permite, inhibir la formación de ferrita en el límite de grano de la austenita debido a que este se encuentra presente en solución sólida y en forma de carburos coherentes en los límites de grano.

- A partir de la información bibliográfica revisada, se propuso la siguiente composición química para la fabricación de los prototipos:

<b>Propuesta de aleación para la producción de dientes de excavadoras para mejorar el rendimiento de los dientes importados en la actualidad</b>		
Elementos	%	Observaciones
Carbono	0,28- 0,33	Formación de carburos, eleva templabilidad (su incremento baja tenacidad)
Boro	0,002-0,005	Evita el efecto negativo del Azufre sobre la tenacidad, forma carburos, ayuda a afinar grano, mejora la templabilidad de los aceros de bajo carbono
Fósforo	< 0,04	Tan bajo como sea posible
Azufre	< 0,04	Tan bajo como sea posible
Silicio	< 0,8	Estabilizador de los carburos
Níquel	0,8 - 1,2	Eleva templabilidad y tenacidad. Valores elevados aumenta Austenita retenida
Cromo	1,0 - 1,4	Eleva templabilidad y forma carburos, aumenta la resistencia al desgaste
Molibdeno	0,4 - 0,6	Eleva templabilidad, forma carburo y evita fragilidad de segundo tipo
Vanadio	0,15 - 0,25	Formador de carburos de alta dureza (exige control preciso del TT), Afina el tamaño de grano
Titanio	0,026 - 0,034	Formador de nitruro y carburo. Afinador de grano
Aluminio	< 0,3	Debe garantizar la reducción del nitrógeno y formar nitruro como afinador de grano

Nota: El diseño del tratamiento térmico de Temple y revenido depende en gran medida es la composición química.

**Tabla 6** Propuesta de aleación.

- De acuerdo con la anterior propuesta, se procedió a fabricar prototipos de dientes de excavadoras, bajo un diseño de moldeo igual a los dientes de la Muestra M que fue el patrón de comparación seleccionado y escogida.



- A partir del método del moldeo se obtuvieron dos prototipos de dientes microaleados al Boro, con diferentes concentraciones de boro, a los que se nombraron : “A1” y “A2”
- El diente “A1” posee 0.005% de Boro y el diente “A2” posee 0.008% de Boro; además de otros elementos aleantes.

A continuación, la composición química de los prototipos de dientes que se obtuvieron mediante el método de moldeo:

Elemento %	Muestra M	Diente A1	Diente A2
Carbono (C)	0,325	0,325	0.327
Silicio (Si)	0,429	1,012	1.012
Manganeso (Mn)	1,085	1,227	1.002
Fosforo (P)	0,023	0,0222	0.0214
Azufre (S)	0,010	0,009	0.009
Cromo (Cr)	1,106	1,063	0.963
Molibdeno (Mo)	0,201	0,275	0.264
Níquel (Ni)	0,138	0,0131	0.019
Cobre (Cu)	0,059	0,028	0.035
Aluminio (Al)	0,037	0,144	0.280
Arsénico (As)	0,0066	-	-
Boro (B)	0,00047	0.005	0.008
Cobalto (Co)	0,0095	0,007	0,008
Antimonio (Sb)	0,0027	-	-
Niobio (Nb)	0,035	0.006	0.010
Estaño (Sn)	0,0056	0.003	0.004
Titanio (Ti)	<0,0010	0,008	0.009
Plomo (Pb)	0,0032	0.000	0.000
Tungsteno (W)	0,0023	-	-
Vanadio (V)	0,032	0,08	0.015
Zinc (Zn)	0,0017	-	-

**Tabla 7** Composición química de dientes prototipos (Acería Procometal, 2015)

La composición química observada anteriormente se obtuvo del promedio de las muestras seleccionada en cada una de las coladas de la fabricación de los dientes prototipos, es decir muestras A1 y muestras A2 de cada lote, en cada colada se fundieron 6 dientes y se hicieron 10 coladas en total para obtener la suma de 10 muestras y a su vez 10 composiciones químicas.

## 7.2 Implementar tratamientos térmicos de temple y revenido en las aleaciones diseñadas para mejorar la resistencia al desgaste, tenacidad y dureza.

Se les aplicó tratamientos térmicos a las muestras A1 y A2, manejando una temperatura de Austenización de 800°C con temple en agua. Posteriormente se realizó un tratamiento térmico de revenido de 300°C para aliviar tensiones producto del temple.



A continuación, se muestra en la figura 14 la curva de tratamiento que se le aplicó a las muestras A1 y A2

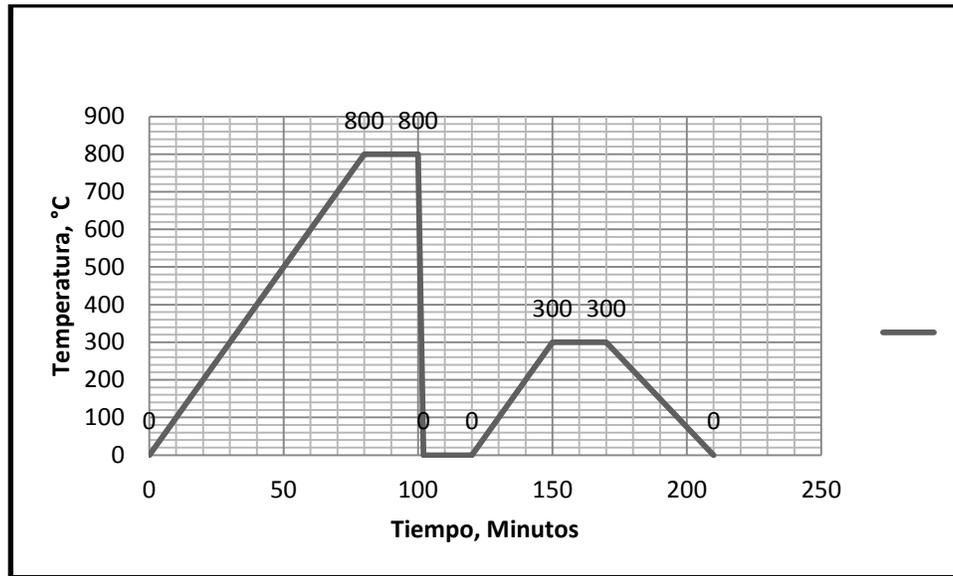


Figura 14. Curva de tratamiento térmico.

También en la Figura 15 y 16 se observan los registros fotográficos de la realización del revenido en cada una de las muestras.



Figura 15 Tratamiento térmico a 300°C durante 20 minutos



**Figura 16** Enfriamiento a temperatura ambiente

Posterior al enfriamiento de las muestras se realizó la caracterización de cada una de las muestras, para evaluar las propiedades mecánicas obtenidas luego de los tratamientos térmicos en la aleación.

A continuación en la figura 17 y 18, se observa el registros fotográficos del ensayo de dureza, tenacidad, micrografías y los resultados encontrados.



**Figura 17.** Preparación de dientes para realizar el ensayo de dureza y penetración en durómetro



**Figura 18.** Ensayo de dureza con Durómetro Portátil HM 6561



En la Tabla 8 se observa los resultados de dureza de las muestras prototipo (A1, A2) y se compara con la obtenida en la muestra M.

Método de estudios/dureza	Muestra M	Muestra A1	Muestra A2
Vickers	445	493	510
Equivalente HRC	45	49	49

**Tabla 8** Resultado de dureza obtenido en los diferentes tipos de dientes.

Posterior a los ensayos de Dureza, en la Figura 19 se observan las probetas obtenidas para realizar el ensayo de impacto Charpy para la muestras A1 y A2.

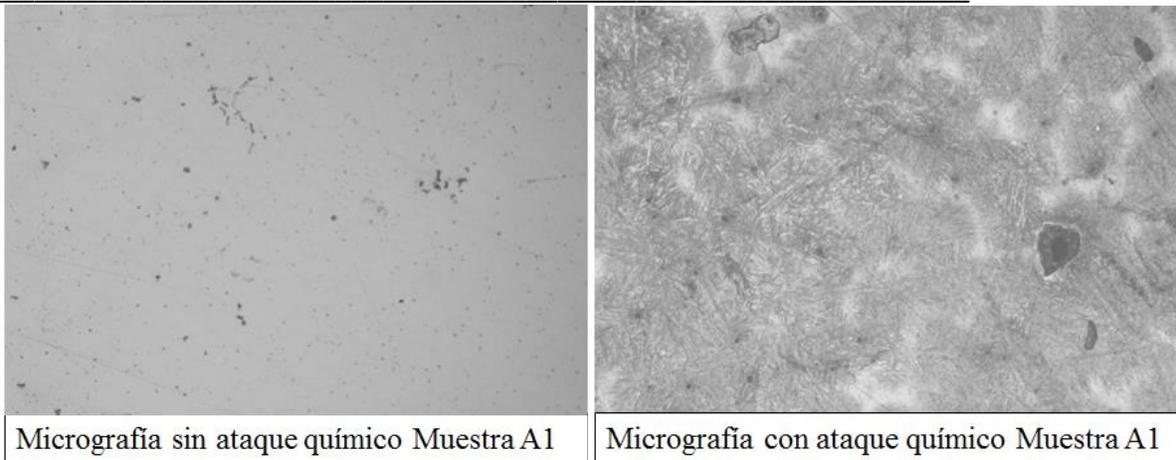


**Figura 19.** Probetas para ensayo de impacto Charpy, Muestras A1 y A2.

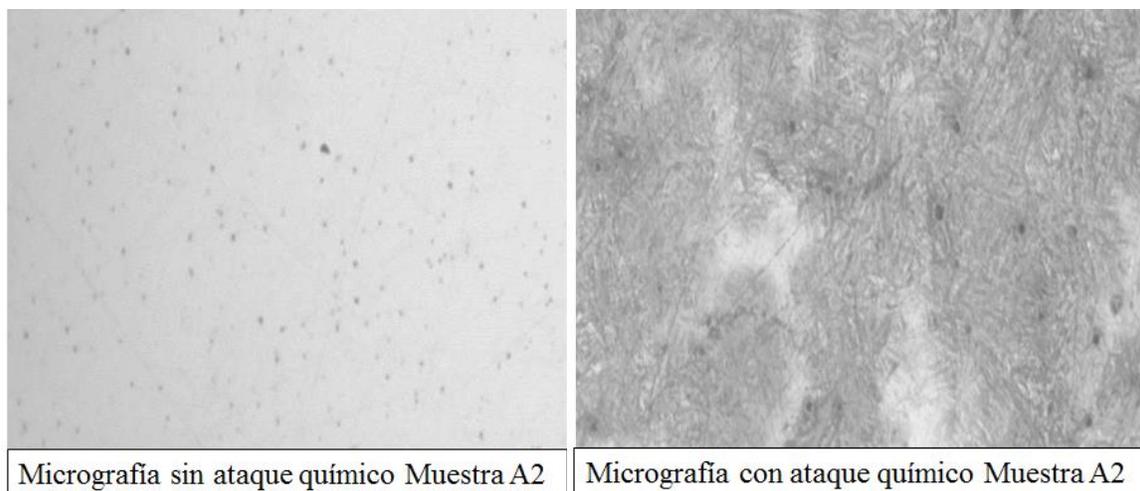
En la Tabla 9 se observa el resultado de impacto a las probetas tipo Charpy obtenidos de acuerdo a la norma ASTM E23 en un laboratorio Certificado.

Método de estudios/Tenacidad	Muestra M	Muestra A1	Muestra A2
Tenacidad (Joules)	21	30	29

**Tabla 9** Resultado de tenacidad obtenido mediante ensayo Charpy.



**Figura 20** Micrografías muestra A1. Sin ataque químico 50x (Izquierda). Con ataque químico 500x (Derecha)



**Figura 21.** Micrografías Muestra A2. Sin ataque químico 50X (Izquierda), Con ataque químico 500x (Derecha)

### **7.3 Comparar el comportamiento en servicio de los dientes de acero micro aleado al boro respecto a los dientes convencionales importados por Colombia.**

Para comparar el comportamiento en servicio de las muestras A1 y A2, con la muestra M, se procedió a realizar una prueba en sitio. Es decir, se montaron en un balde de excavadora los dientes de la muestra A1 y A2, con dientes de la muestra M.

### 7.3.1 Comportamiento Muestra A1 & Muestra M; sobre suelos de arranque difícil.

Se colocaron tres (3) dientes de la muestra A1 y dos (2) dientes de la muestra M, tal como se muestra en la siguiente fotografía (ver Figura 22):



**Figura 22.** Montaje de los dientes en la excavadora.

Los dientes se montaron de forma estratégica con el objetivo de que los dientes comerciales y los del proyecto trabajaran de la misma forma y cumpliendo la misma función durante la operación de la excavadora.

Las pruebas de campo fueron realizadas en dos lugares: el primero de ellos en una cantera de propiedad de una de las empresas participantes de la investigación, la cual se dedica a la explotación de canto rodado y piedra caliza, ubicada en el corregimiento de Arroyo de piedra. Y en trabajos de movimientos de tierra sobre la vía al mar entre Barranquilla y Cartagena, en donde los dientes no son expuestos a rasgar rocas, ni friccionar contra piedras.

Durante la realización de la prueba en campo, se llevaron los registros del día a día y de las horas trabajadas por la máquina.

A continuación, uno de los registros diligenciados durante el ensayo en campo en el corregimiento de Arroyo de Piedra:

Fecha	Horas trabajadas
03/03/2016	8,7

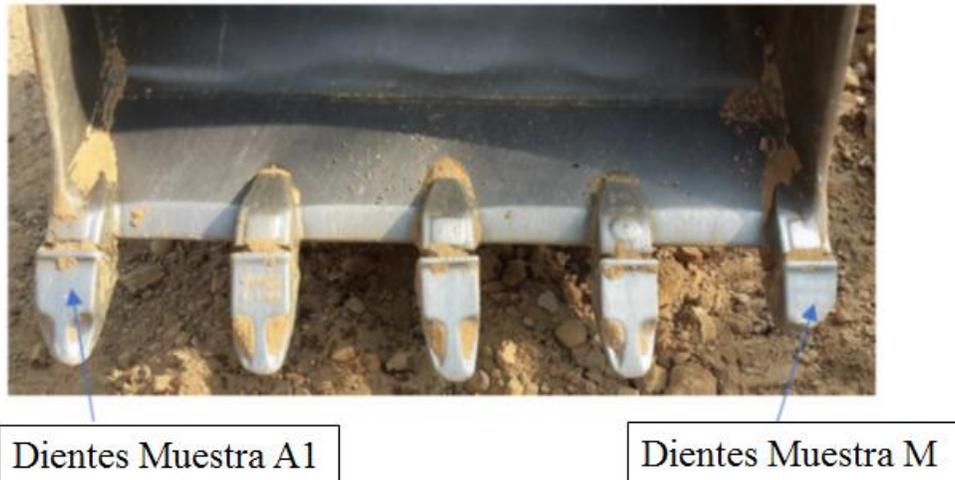


04/03/2016	8,6
05/03/2016	5
06/03/2016	No se trabajo
07/03/2016	11
08/03/2016	10

**Tabla 10** Registro usado durante el ensayo en campo

El primer análisis de comparación realizado entre los dientes A1 y los dientes de la Muestra M, se realizó el día número 6 de operar la excavadora, al haber transcurrido 43,6 horas de trabajo.

En el primer análisis se evidenció un desgaste total en la Muestra M, tal como se observa en la siguiente fotografía :



**Figura 23.** Condiciones de los dientes después de 7 días de operación



**Figura 24** Comparación del desgaste entre dientes prototipo y dientes Muestra M, después de 7 días de operación



En la figura 24 se observa la diferencia en el desgaste en los diferentes tipos de dientes, donde se evidencia que el desgaste fue mayor en la Muestra M, en comparación con la muestra A1

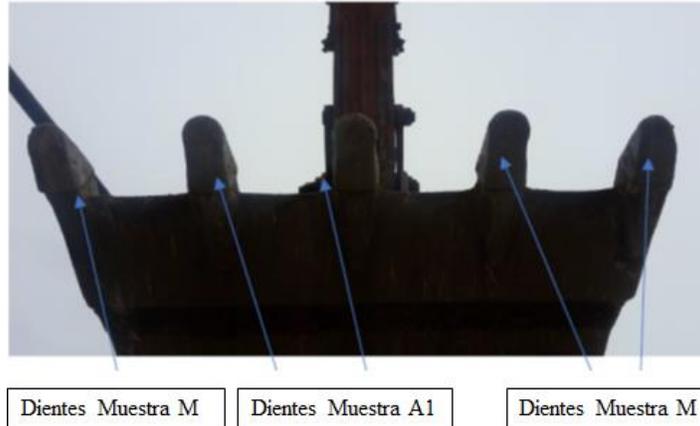
Luego de tomar los registros fotográficos se procedió a retirar los dientes que se encuentran en los laterales, aunque el diente de la investigación podía seguir en operación, fue necesario hacer pruebas en laboratorio y comparar ambos dientes, también se observó (ver Figura 25) que el desgaste en la Muestra M fue total y se alcanzó a percibir la base del portadiente.



**Figura 25** Comparación de los dientes laterales después de operación

### **7.3.2 Comportamiento Muestra A1 & Muestra M; sobre suelos de arranque fácil o arcillosos.**

Se continua la prueba de campo con la siguiente combinación en el balde, tres (3) dientes de la Muestra M y dos (2) dientes de la muestra A1. Como se muestra en la figura 20



**Figura 26** Montaje de los dientes en la excavadora suelo arcilloso

Los trabajos realizados en esta nueva zona se desarrollaron con una máquina excavadora de menor tamaño DOOSAN 210 WV.

A continuación en la tabla 12 se observa uno de los registros diligenciados durante el ensayo en campo en terrenos arcillosos:

Fecha	Horas
04/05/2016	2,5
06/05/2016	7
07/05/2016	5
08/05/2016	7
09/05/2016	8
10/05/2016	No se trabajo
11/05/2016	9
13/05/2016	6
14/05/2016	5
15/05/2016	6
16/05/2016	No se trabajo
17/05/2016	8
18/05/2016	3
20/05/2016	7
21/05/2016	7
22/05/2016	5
23/05/2016	No se trabajo
24/05/2016	5
25/05/2016	2,5

**Tabla 11** Registro usado durante el ensayo en campo en terrenos arcillosos.



El tiempo transcurrido durante el ensayo en terrenos arcillosos fue de dos (2) meses. Al cabo de este tiempo, se procedió a desmontar los dientes del ensayo.

Los resultados obtenidos muestran que la Muestra M se desgastó más que la muestra A1, tal como se muestran en el siguiente registro fotográfico:



Figura 27 Comparación del desgaste de los dientes después de trabajar por dos meses en la zona blanda o arcillosa..

### 7.3.3 Comportamiento dientes A2 & Muestra M; sobre suelos de arranque difícil.

Se colocan en un balde de 6 bases o (porta dientes) que trabajaron en la cantera de canto rodado en el Corregimiento de Arroyo de Piedra, como se muestra en la figura 28.



Figura 28 Convención de la ubicación de los dientes Muestra M y dientes Muestra A2

A continuación en la tabla 12 uno de los registros diligenciados durante el ensayo en campo en terrenos:

Fecha	Horas trabajadas
-------	------------------



12/09/2016	5
13/09/2016	NO SE TRABAJO
14/09/2016	5,5
15/09/2016	4
16/09/2016	11
17/09/2016	8

**Tabla 12** Registro de horas trabajadas, Muestra A2 y Muestra M

Después de 33,5 horas de trabajo, Se desmontaron las muestras para hacer la comparación entre estas.

Durante los resultados se muestra que el desgaste de la Muestra M es mayor comparado con la muestra A2. Mientras que la Muestra M debe ser remplazada, la muestra A2 podría continuar trabajando.

A continuación, un registro fotográfico (ver Figura 29) que muestra el desgaste obtenido en los dientes comparados.



**Figura 29.** Comparación del desgaste generado en cada diente con el mismo tiempo de operación

## 8. ANALISIS DE RESULTADOS

De manera general, el grupo de investigación logro comprobar que, los dientes de la Muestra M (es decir, los comerciales) se desgastaron más rápido que los dientes de la muestra A1 y A2

En la figura 17 y 18 se aprecia la microestructura de las muestras A1 y A2. Para ambas muestras, se ve una estructura martensítica, producto del tratamiento térmico al cual fueron sometidas



ambas muestras. El menor espesor de los listones martensíticos en las muestras, es responsable de la tenacidad superior en comparación con la muestra M, como se aprecia en la tabla 6.

La formación de carburos y nitruros de boro presentes en las muestras no solo favorecen a la formación martensítica sino que también ayudan a afinar los listones de martensita, aumentando así su resistencia al desgaste.

Los dientes prototipo de la investigación superaron en aproximadamente 3 veces en rendimiento al desgaste, a los dientes de la Muestra M, es decir por cada tres remplazos de los dientes M se remplazaba un diente prototipo.

En la tabla 13 se comparan los parámetros (dureza, composición química, tenacidad y rendimiento al desgaste) para cada uno de los dientes encontrados en el mercado y para cada uno de los prototipos probados en campo:

<b>Comportamiento de los diferentes tipos de dientes en los diferentes tipos de suelo</b>						
Ítem	Muestra M En suelo de arranque difícil	Muestra A1 En suelo de arranque difícil	Muestra A2 en suelo de arranque difícil	Muestra M En suelo de arranque fácil	Muestra A1 en suelo de arranque fácil	Muestra A2 en suelo de arranque fácil
Dureza Equivalente HRC	45	49	49	45	49	49
Composición química	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual	Igual
Rendimiento al desgaste (horas)	43	130	120	90	300	270
Tenacidad (Joules)	21	30	29	21	30	29

**Tabla 13** Comportamiento de los diferentes tipos de dientes presentes en la investigación

Posterior a la tabla de resultados donde se observa de forma comparativa los rendimientos de los dientes prototipos (A1 y A2) y los de la Muestra M. Se ilustra a continuación de forma gráfica cada uno de los resultados y parámetros que se pudo comparar, medir y controlar en la prueba de campo, ver Figura 30 a Figura 35 y se observa los parámetros de porcentaje de desgaste de los



dientes en los diferentes suelos que se aplicó la prueba, los números de cambios o remplazos de los dientes y la resistencia al impacto de cada uno de los dientes en comparación.

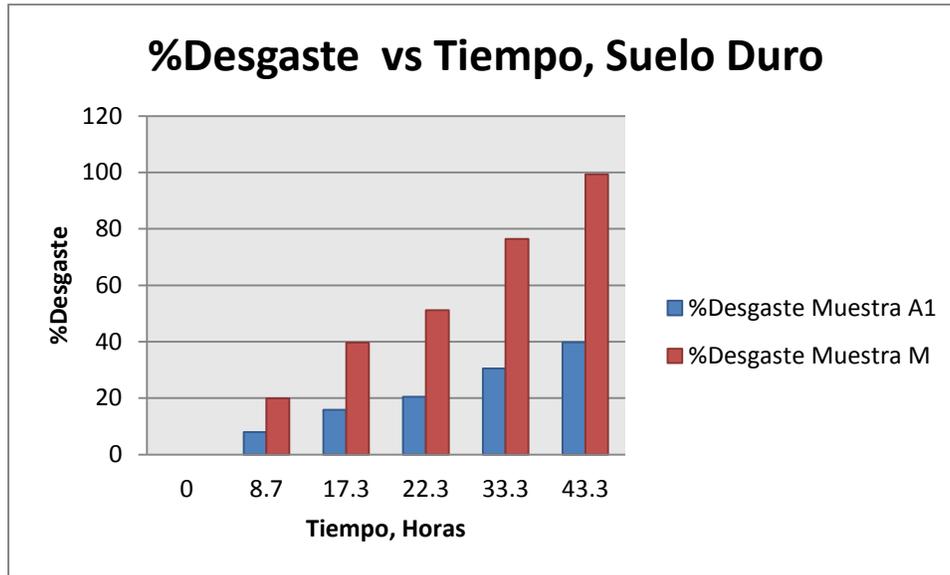


Figura 30. Grafica %Desgaste vs Tiempo en suelo duro, Muestra M vs Muestra A1

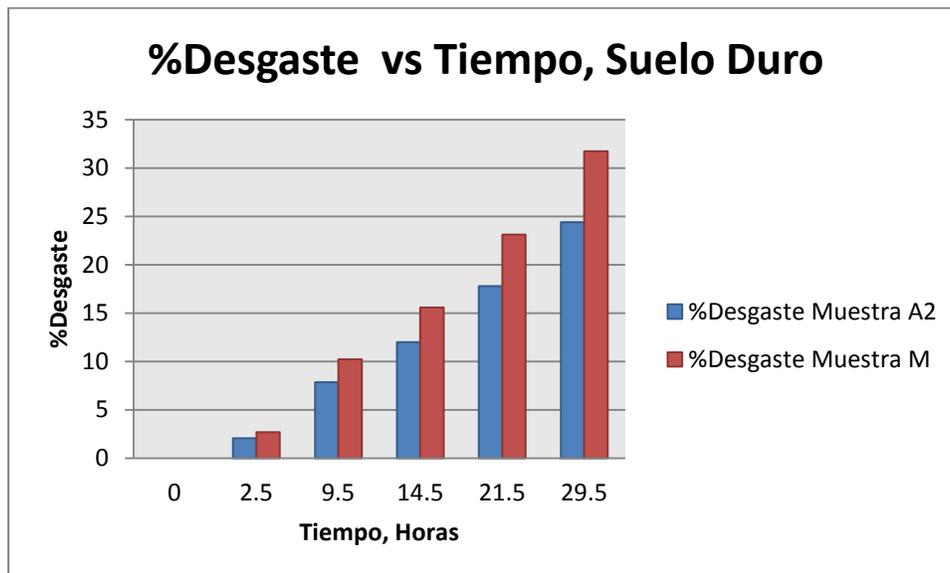


Figura 31. Grafica %Desgaste vs Tiempo en suelo duro, Muestra M vs Muestra A2

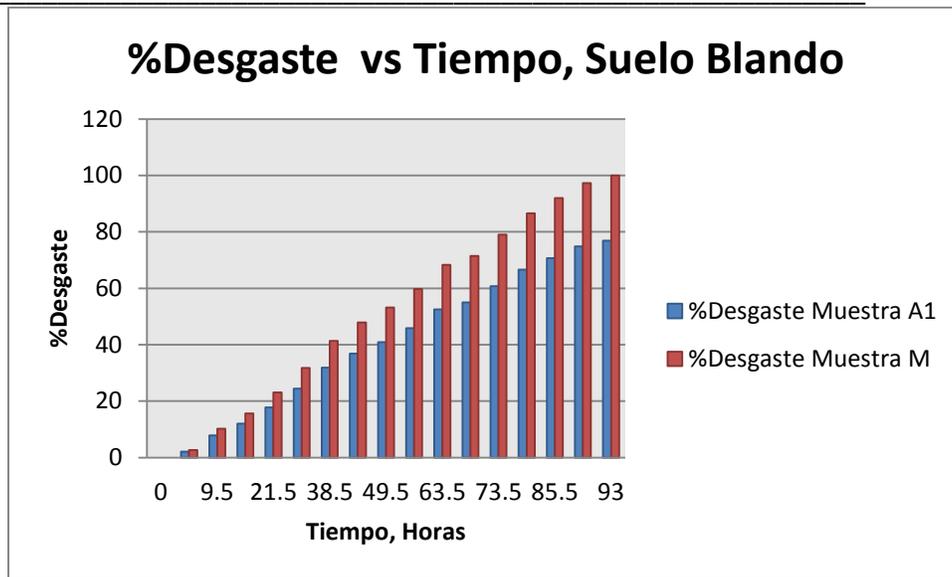


Figura 32. Grafica %Desgaste vs Tiempo en suelo blando, Muestra M vs Muestra A1

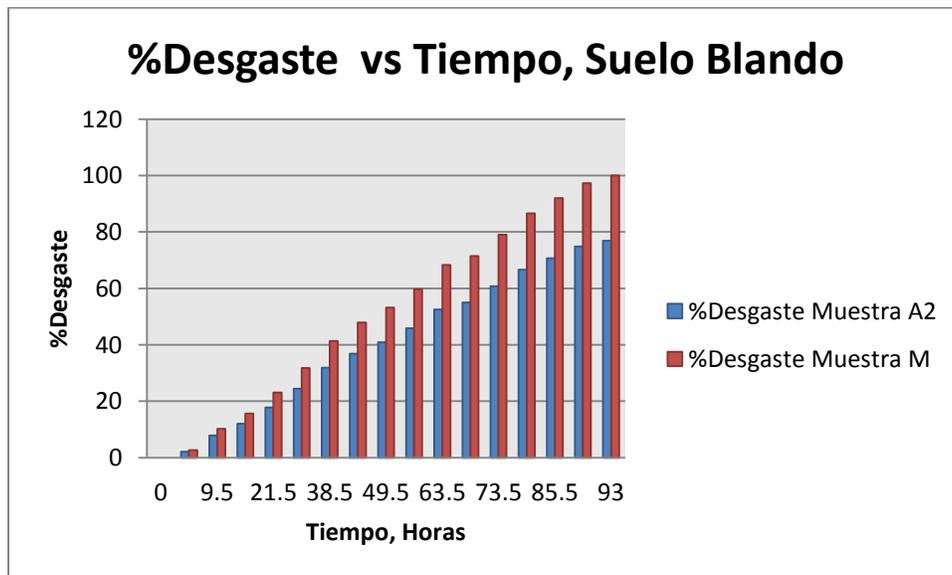


Figura 33. Grafica %Desgaste vs Tiempo en suelo blando, Muestra M vs Muestra A1

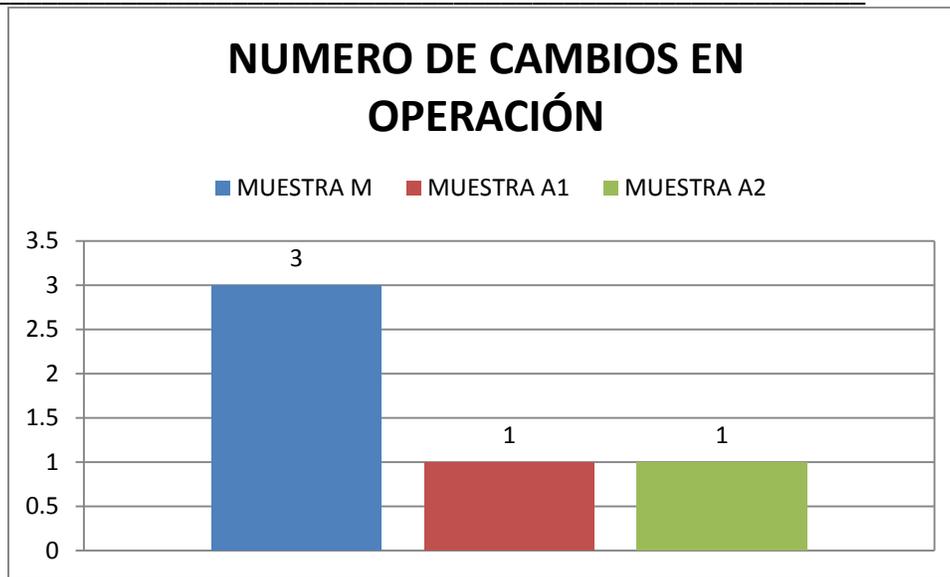


Figura 34. Grafica Numero de cambios en operación

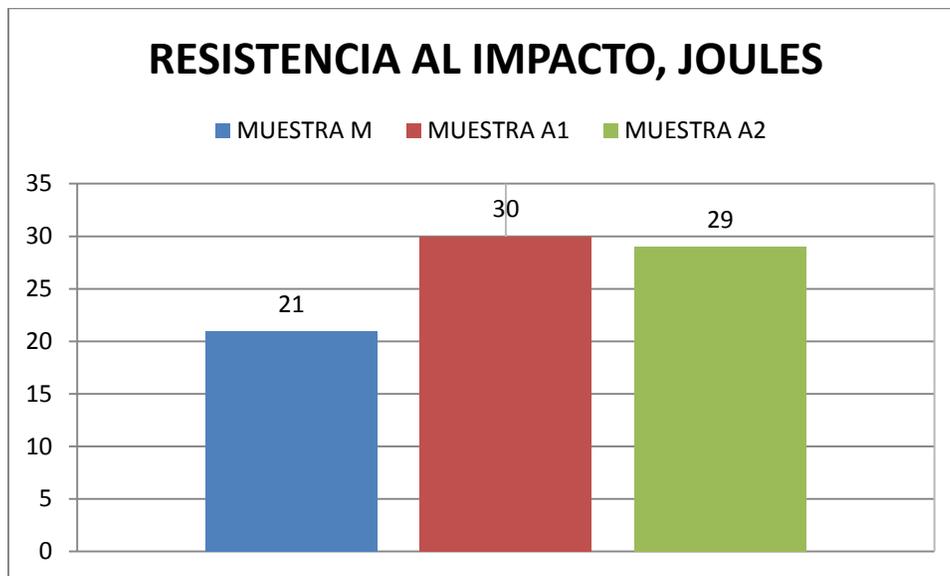


Figura 35. Resistencia al impacto, Joules.

De acuerdo con los resultados, se puede analizar qué tan competitivos sería fabricar este tipo de dientes en Colombia garantizando una mayor durabilidad al desgaste y así perder menos horas de operación en el remplazo muy seguido de los dientes de excavadoras. También la empresa colaboradora expresó su satisfacción a las pruebas realizadas que se puede observar en el Anexo3.



## 9. CONCLUSIONES

Esta investigación alcanzó a responder el planteamiento del problema formulado y a desarrollar los objetivos propuestos, ya que se logró diseñar e implementar una nueva aleación capaz de mejorar el rendimiento de los dientes en las operaciones más severas que las excavadoras ejecutan a diario. Y, además, los resultados encontrados comprobaron que el rendimiento es tres veces mayor al compararlos con los dientes disponibles en el mercado colombiano, es decir los dientes importados de países como Corea y China.

También, se concluye lo siguiente:

- Se logró el intervalo establecido (0.002% – 0,005%) de boro para lograr el efecto de endurecimiento del boro luego del temple y revenido (dureza entre 40 y 50 HRC) y sobre todo para garantizar la elevada resistencia al desgaste debido a la formación de las fases de nitruro y carburos de boro.
- El porcentaje de 0.005% de Boro en la Muestra A1 fue determinante para conseguir el rendimiento deseado al obtener un acero resistente al impacto y resistente al desgaste.
- Los resultados demostraron que la Muestra A2 presenta un mejor rendimiento que los dientes importados, aunque el intervalo sugerido por la literatura de 0.002% a 0.005% era el recomendado, se obtuvieron buenos resultados para 0.008% de boro.
- El rendimiento de los dientes de excavadora micro-aleados al boro en las pruebas en servicio fue superior al de los dientes importados en Colombia; en cualquiera de las aplicaciones a los que fueron sometidos. Se evidenció que los dientes A1 al final de la vida útil produjeron 130 horas trabajadas en suelo de arranque difícil comparado con un promedio de 43 horas para tres juegos de dientes de la Muestra M probados en la misma maquina y la misma aplicación.



---

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook (1992) - Alloy Phase Diagrams, Volume 3. ASM International.
- [2] Budynas, R & Nisbett, K. (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design, Tenth Edition. New York: McGraw-Hill Education.
- [3] Costes, J. (1975). Maquinas para movimiento de tierra, Segunda Edicion . Barcelona-España: Editores Tecnicos Asociados.
- [4] Kapadia, B. (1997) Prediction of the boron hardenability effect in steel -A comprehensive review. Hardenability concepts with applications to steel. Chicago, 448-492.
- [5] Leslie, William C. (1991). *The Physical Metallurgy of Steels*. TechBooks.
- [6] López, M & Herrera, J (2013). Análisis del desgaste producido en un diente de excavadora (Tesis de Grado). Universidad Veracruzana, México.
- [7] Maalekian, M. (2007). The Effects of Alloying Elements on Steels (I). Graz: Technische Universität Graz.
- [8] Norton, R (2011). Machine Design, 4th edition. Mexico: Pearson.
- [9] Ramírez, P & Monge, L. (2004) Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, España.
- [10] Rosario, S. (2004). Curso selección de aceros especiales. Introducción a los aceros especiales. (Curso) Universidad Nacional Mayor San Marcos, Perú.



[11] Salas, S. (2009). Estudio de la fluencia en caliente de un AHSS microaleado con boro. (Tesis de Grado). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

[12] Serrano, A & Garcés, A (2013). Caracterización de los Dientes de Draga y Desarrollo de Nuevas Aleaciones” (Tesis de Grado) Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia.

[13] Sierra, H. (2011). Propiedades mecánicas del acero 15B30. Universidad Eafit: 68-75.

[14] Wulpi, D. (1990) Understanding How Components Fail, Amer. Soc. for Metals: Metals Park, Ohio,



## 11. ANEXOS



NIT: 890.401.962-0

270T,

Cartagena de Indias D. T. y C., 18 de diciembre del 2015.

Señor  
ING. JOSÉ LUIS PACHECO STRIEDINGER  
MAQUINZA SAS.

Asunto: Colaboración Universidad Empresa para el desarrollo del proyecto DIDRA

Estimado ingeniero para la Dirección de Investigaciones, Emprendimiento e Innovación de la Universidad Tecnológica de Bolívar es un placer contar con su apoyo y el de su empresa en el desarrollo del proyecto Desarrollo de Dientes de Draga y Retroexcavadoras micro aleados al boro, específicamente en la evaluación comparativa en pruebas de campo que consiste en montaje y monitoreo de tres dientes prototipo junto a tres dientes importados. Siendo esta la primera prueba luego de la obtención en Colombia de una aleación especial muy resistente al desgaste abrasivo.

Para el desarrollo de esta prueba se ha encargado al estudiante de la UTB Jorge Luis Orta bajo la tutoría del PhD. Luis Marcos Castellanos, director científico del proyecto.

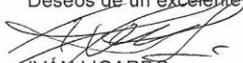
Le agradecemos de antemano todo su apoyo en esta iniciativa. De seguro que podremos seguir contando con Ud. para nuevas pruebas en el proceso de optimización de las propiedades mecánicas del producto obtenido.

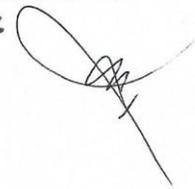
Estamos seguros que su empresa será beneficiaria de los resultados que se obtengan en la obtención de dientes de alto desempeño, fabricados en Colombia competitivos por costo rendimiento.

Los dientes que suministre MAQUINZA en estas pruebas comparativas serán comprados por la UTB en el mes de enero, pues se requiere disponer de ellos una vez termine la prueba de campo para su caracterización a escala de laboratorio. Durante esta prueba, se debe controlar el tiempo real de trabajo del equipo y realizar evaluación del grado de desgaste de las piezas con una frecuencia determinada hasta que termine la prueba.

Desde la UTB un saludo especial

Deseos de un excelente fin de año

  
IVÁN LIGARDO  
Coordinador de Investigaciones, Emprendimiento e Innovación

Recibi: 

Campus Casa Lemaitre: Calle del Bouquet Cra. 21 No. 25-92 PBX: (5) 660 6041 Fax: (5) 660 4317  
Campus Tecnológico: Parque Industrial y Tecnológico Carlos Vélez Pombo. PBX: (5) 653 5200 Fax: (5) 661 9240  
www.unitecnologica.edu.co / Cartagena de Indias - Colombia

### ANEXO 1 CARTA DE ACEPTACION DE COLABORACION DE MANQUINZA SAS EN EL PROYECTO



Medellín, 26 de Octubre de 2015

Señor(es):  
Alex Restrepo  
CIDEMAT  
Medellín



Asunto: Informe composición química.

Estamos enviando los resultados del análisis químico, efectuados a la muestra suministrada por ustedes.  
EQUIPO: ESPECTRÓMETRO DE EMISIÓN ÓPTICA MARCA BRUKER, MODELO: Q8 MAGELLAN.

LOS RESULTADOS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LAS MUESTRAS REFERENCIADAS EN ESTE INFORME.

Consecutivo No. OES261015-81			Muestra: J		Estándar de verificación: BAS 434-1, ARMI IARM 30B GRADO 4140		
Elemento	Carbono (C)	Silicio (Si)	Manganeso (Mn)	Fósforo (P)	Azufre (S)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)
%p/p	0.446	0.415	0.514	0.019	0.014	0.712	0.111
Elemento	Niquel (Ni)	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Boro (B)	Cobalto (Co)	Antimonio (Sb)
%p/p	0.096	0.028	0.065	0.0050	0.00049	0.0048	0.0013
Elemento	Niobio (Nb)	Estaño (Sn)	Titanio (Ti)	Plomo (Pb)	Tungsteno (W)	Vanadio (V)	Zinc (Zn)
%p/p	0.0039	0.0036	0.0013	0.0020	<0.0020	0.0055	0.0027

Consecutivo No. OES261015-80			Muestra: M		Estándar de verificación: BAS 434-1, ARMI IARM 30B GRADO 4140		
Elemento	Carbono (C)	Silicio (Si)	Manganeso (Mn)	Fósforo (P)	Azufre (S)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)
%p/p	0.325	0.429	1.085	0.023	0.010	1.106	0.201
Elemento	Niquel (Ni)	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Boro (B)	Cobalto (Co)	Antimonio (Sb)
%p/p	0.138	0.059	0.037	0.0066	0.00047	0.0095	0.0027
Elemento	Niobio (Nb)	Estaño (Sn)	Titanio (Ti)	Plomo (Pb)	Tungsteno (W)	Vanadio (V)	Zinc (Zn)
%p/p	0.0035	0.0056	<0.0010	0.0032	0.0023	0.032	0.0017

Andrés Felipe Santacruz Londoño  
Técnico de Laboratorio  
Universidad de Antioquia

Ricardo Emilio Aristizábal Sierra, PhD.  
Director Laboratorio de Fundición  
Universidad de Antioquia



**MAQUINZA COLOMBIA S.A.S.**  
CIF 900535213-3  
Avenida Circunvalar No. 10 - 427, Bodega No. 11  
Teléfonos: 3854910 - 3854911  
Barranquilla, Atlántico.

[www.maquinza.com.co](http://www.maquinza.com.co)  
[www.maquinza.co](http://www.maquinza.co)

Barranquilla, 27 de octubre 2016.

Señores

De la Dirección de Investigación, Emprendimiento e Innovación de la Universidad Tecnológica de Bolívar y de la Empresa Ferretería Ignacio Sierra

Cartagena de Indias

**Asunto: Aval de la empresa MAQUINZA SAS al resultado de las pruebas de campo con dientes de excavadora obtenidos en el proyecto DIDRA**

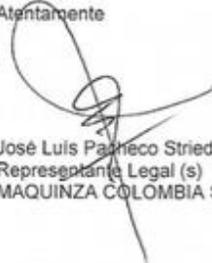
Cordial saludo.

Ante todo, la Empresa MAQUINZA SAS desea agradecer la oportunidad que se nos ha dado de participar en el proyecto "Desarrollo de Dientes de Draga y Retroexcavadora micro aleado al boro" (DIDRA) liderado por la Dirección de Investigación, Emprendimiento e Innovación de la Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB) y la empresa Ferretería Ignacio Sierra (FIS SAS).

Queremos además, manifestar que los resultados en las pruebas de campo fueron muy satisfactorios, quedando demostrado que los dientes micro aleados al boro tuvieron un rendimiento que supera el doble de la vida útil de los dientes similares importados. Estas pruebas fueron desarrolladas con un estricto control del tiempo de operación, características del material a remover y con la supervisión del operador y el jefe de mantenimiento. Para las pruebas experimentales de campo se usaron equipos de nuestra empresa y se llevaron a cabo en un período de ocho meses, de febrero a septiembre del presente año.

Nuestra empresa estará haciendo una evaluación del costo beneficio que implicaría introducir los dientes micro aleado al boro obtenido en el proyecto DIDRA en nuestras excavadoras. Consideramos que la empresa FIS SAS nos ofrece una buena oportunidad para reducir importaciones aprovechando las capacidades de la industria nacional

Atentamente

  
José Luis Pacheco Striedinger  
Representante Legal (s)  
MAQUINZA COLOMBIA SAS

**ANEXO 3 Carta de Aprobación y Satisfacción de MAQUINZA SAS**