

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**UNIDAD DE POSTGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA MECÁNICA**

**MANUFACTURA, RECUPERACIÓN Y REFUERZO DE
HERRAMIENTAS DE CORTE PARA MAQUINARIA PESADA EN
ECUADOR**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN SISTEMAS
AUTOMOTRICES**

ING. ANDRÉS EDUARDO MORÁN NAVARRETE

andresedu1987@outlook.com

DIRECTOR: ING. ALFREDO GUILLERMO VALAREZO GARCÉS, PhD

avalarezo@usfq.edu.ec

Quito, noviembre de 2016

DECLARACIÓN

Yo, Andrés Eduardo Morán Navarrete, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**Andrés Eduardo Morán
Navarrete**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por ANDRÉS EDUARDO MORÁN NAVARRETE bajo nuestra supervisión.

Ing. Alfredo Valarezo, PhD.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Galo Barragán
CO-DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitir que esto sea posible. A mi Director, Alfredo Valarezo, por brindarme su apoyo incondicional durante el desarrollo de todo el trabajo. A todos quienes son parte de Imetca Cia. Ltda. por su ayuda y finalmente, a todos aquellos que han sido parte de esta investigación, y que hicieron que este trabajo concluya, muchas gracias.

Andrés E. Morán N.

DEDICATORIA

A Marlene, mi madre, quien es mi inspiración de lucha constante y ejemplo de vida, a mi tío Juan y Doménica.

Andrés E. Morán N.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN	I
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE GENERAL	V
INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	XII
PRESENTACIÓN.....	XIII
1. Introducción.....	1
2. Materiales y Métodos	5
2.1. Caracterización de los materiales originales.....	5
2.2. Refuerzo de las puntas con recargue duro	10
2.3. Producción y pruebas de campo de las puntas recargadas.....	13
3. Resultados.....	15
3.1. Resultados de la caracterización de los materiales originales	15
3.2. Resultados del refuerzo de las puntas con recargue duro	23
3.3. Resultados de la producción y pruebas de campo de puntas recargadas	29
3.4. Análisis económico de factibilidad de la manufactura y refuerzo de las puntas ..	34
4. Discusión	39
4.1. Caracterización de las puntas originales.....	39
4.2. Refuerzo de las puntas	41
4.3. Manufactura y recuperación.	46
5. CONCLUSIONES.....	47
6. BIBLIOGRAFIA.....	49

ANEXO 1	54
ANEXO 2	55
ANEXO 3	56
ANEXO 4	57
ANEXO 5	59
ANEXO 6	60
ANEXO 7	61
ANEXO 8	62
ANEXO 9	64
ANEXO 10	65
ANEXO 11	66
ANEXO 12	67
ANEXO 13	68
Manufactura, Reconstrucción y Refuerzo de Herramientas de Corte para Maquinaria Pesada en Ecuador	69
ABSTRACT	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades mecánicas teóricas del acero AISI S2. (MatWeb, 1996-2016)	3
Tabla 2.- Composición química del electrodo E6-UM-65-GRZ. Fuente: KESTRA UNIVERSAL SOLDAS INC.	11
Tabla 3.- Composición química de los polvos de MESSER 1030 y 1070. Fuente: http://www.messerwelding.com/	12
Tabla 4.- Promedio y desviación estándar de las medidas de dureza HRC de las muestras A, B y C. Fuente: Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, Escuela Politécnica Nacional (LAEV – JUL98.15).....	15
Tabla 5. Composición química de las muestras A, B y C obtenidas del análisis por espectrometría de Chispa con atmósfera de argón. Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva, Escuela Politécnica Nacional (RM-8299, 04/09/2015).	19
Tabla 6.- Durezas de las muestras recocidas y Templada + Revenida 1 y 2 de la muestra C.	22
Tabla 7.- Cuadro de durezas de los recargues antes y después del tratamiento térmico	29
Tabla 8.- Datos de los costos en los tres procesos de refuerzo de las puntas. Fuente: Greenweld, 2016.....	37
Tabla 9.- Composición química de los aceros con sus principales aleantes.	39
Tabla 11.- Coeficientes de expansión térmica lineal aproximada y longitudes del electrodo UM65 y del acero "C" a 900°C y 5°C (temperaturas máxima y mínima en el "tratamiento térmico 2"). Fuente: (MatWeb, 1996-2016)	42
Tabla 11.- Promedio de durezas de los refuerzos medidos y teóricos. HRC.....	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Análisis de elementos finitos generado en el software ANSYS R16.0 aplicando una fuerza de 137.5 KN en el extremo de la punta.....	2
Figura 2.- Diagrama de flujo usado para determinar el tratamiento térmico del acero de las puntas de retroexcavadora.....	7
Figura 3.- Diagrama Tiempo-Temperatura del primer ensayo de tratamiento térmico.....	8
Figura 4.- Diagrama Tiempo-Temperatura del segundo de tratamiento térmico. .	10
Figura 5.- Montaje de las cuatro puntas para la prueba de campo en un cucharón de una excavadora CATERPILLAR 320D con seis adaptadores.....	14
Figura 6.- Forma de medición de la dureza de las muestras A, B y C.....	16
Figura 7.- Micrografía a 100X y 500X de la muestra A atacada con Nital al 10%. Se observa bainita acircular, martensita y precipitados de grafito en forma de hojuelas, condición original de compra. (ASM International, 2002)	16
Figura 8.- Proceso de formación granular, Tomado y traducido de: (ASM International, 2008) pag20, cap2.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9.- Micrografía a 100X y 500X de la muestra B, atacada con Nital al 10%. Se observa bainita acircular, martensita, Condición original de compra. (ASM International, 2002)	18
Figura 10.- Micrografía a 100X y 500X de la muestra C, atacada con Nital al 10%. Se observa una microestructura de martensita acircular y nódulos de grafito, condición original de compra.	18
Figura 11.- Diagrama de precipitación isotérmica de la austenita, curva del acero al carbón y de acero aleado con Ni, Mn y Si. Tomado y traducido de: (George E. Totten, 1997)	20
Figura 12.-Micrografía a 2000X de la muestra C atacada con Nital al 10% durante 4 minutos, luego de ser enfriada en horno durante 13 horas aproximadamente. Se observa la formación de ferrita y perlita.....	21
Figura 13.- Comparación micrográfica a 100X del acero C atacado con Nital al 3% durante 15. a) Acero "C" original, b) acero "C" recocido, templado + revenido 2.	22
Figura 14.- Macrografías de las muestras recargadas con: varilla de aporte de carburo de tungsteno atacada con Nital al 10% durante 5 segundos, soldadura de	

arco eléctrico atacada con Nital al 10% durante 7 segundos, y con termorociado con polvos de carburo de tungsteno atacada con Nital al 10% durante 5 segundos. Se observan: a) zona templada al aire, b) ZAC y c) formación de estructura granular.	23
Figura 15.- Mapa de contorno de dureza en el material base luego de aplicar refuerzo con varilla de aporte de carburo de tungsteno, dureza medida en HRC.	24
Figura 16.- Mapa de contorno de dureza en el material base luego de aplicar refuerzo por soldadura de arco eléctrico, dureza medida en HRC.	25
Figura 17.- Mapa de contorno de dureza en el material base luego de aplicar polvos de carburo de tungsteno por termorociado, dureza medida en HRC.	26
Figura 18.- Mapas de contorno de las muestras reforzadas con varilla de aporte de carburo de tungsteno, previo y posterior al tratamiento térmico.	27
Figura 19.- Mapas de contorno de dureza en el material base de las muestras reforzadas por suelda de arco eléctrico, previo y posterior al tratamiento térmico.	27
Figura 20.- Mapas de contorno de dureza del material base en muestras reforzadas por termorociado con polvos de carburo de tungsteno, previo y posterior al tratamiento térmico.....	28
Figura 21.- Comparación de la punta reforzada con varilla de aporte de carburo de tungsteno luego de 77 horas de trabajo.	30
Figura 22.- Comparación de la punta reforzada con suelda de arco eléctrico luego de 77 horas de trabajo.	31
Figura 23.- Comparación de la punta reforzada por termorociado con polvos de carburo de tungsteno luego de 77 horas de trabajo.	32
Figura 24.- Comparación de la punta original luego de 77 horas trabajadas en el equipo.....	33
Figura 25.- Pérdida por desgaste abrasivo en escala arbitraria versus aleación de hierro en porcentajes de carbono, medido por el método de pin abrasivo. Tomado de: (GAHR, 1987).....	40
Figura 26.- Macrografía de la muestra reforzada por termorociado con polvos de carburo de tungsteno, dividida en tres zonas de afectación térmica.....	44

Figura 27.- Relación entre la dureza y resistencia al desgaste abrasivo de diferentes microestructuras y aceros aleados. Tomado y modificado de: (GAHR, 1987) 45

INDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1** Análisis de esfuerzos realizados en ANSYS R16.0.
- ANEXO 2** Proceso de obtención de las muestras A, B y C.
- ANEXO 3** Imágenes de los ensayos de tratamiento térmico.
- ANEXO 4** Aplicación de los refuerzos en las puntas y muestras.
- ANEXO 5** Hoja técnica del electrodo de refuerzo.
- ANEXO 6** Hoja técnica de la varilla de aporte de carburo de tungsteno.
- ANEXO 7** Imágenes de las muestras recargadas ante y después del tratamiento térmico.
- ANEXO 8** Microestructura de la junta de los materiales base y refuerzos.
- ANEXO 9** Micrografía de los carburos de tungsteno.
- ANEXO 10** Montaje de las puntas para la prueba de camp.
- ANEXO 11** Tabla de cálculo para el cálculo de consumo de energía en el tratamiento térmico.
- ANEXO 12** Vista lateral de las puntas desgastadas luego de 77 horas de trabajo.
- ANEXO 13** Desglose de costos por aplicación de refuerzos.

RESUMEN

El cambio en la matriz productiva que impulsa el gobierno nacional, ha motivado a realizar estudios acerca de productos que son importados al país, para conocer si estos pueden ser finalizados o manufacturados localmente. Por lo tanto, se decidió enfocar el presente trabajo, en determinar la viabilidad de los procesos de refuerzo y/o manufactura de herramientas de corte para maquinaria pesada, más conocidas como puntas. Para ello, se realizó la caracterización de tres puntas, mediante ensayos de dureza, micrografía, espectrometría de chispa y tratamiento térmico, de donde se logró determinar que el material de las puntas es un acero de herramienta (hipoeutectoide aleado con Si, Mn y Cr) y su microestructura muestra evidencia de tratamiento térmico pues existen precipitados. Luego se continuó con la aplicación de tres refuerzos por: soldadura de arco eléctrico, varilla de aporte de “WC en matriz de níquel” (carburos de tungsteno de orden milimétrico) y termorociado por flama con polvos de “WC en matriz de aleación de Ni” (carburos de tungsteno orden micrométrico). Finalmente se realizaron pruebas de campo de cuatro puntas, tres recargadas y una original. Los procesos de recargue duro causaron afectación del material base, por lo que se desarrolló un tratamiento térmico que devuelva las propiedades al material base. Se aplicó el tratamiento y se identificó una baja afectación del tratamiento al recargue.

PRESENTACIÓN

El cambio en la matriz productiva que impulsa el gobierno nacional, ha motivado a realizar estudios acerca de productos que son importados al país, para conocer si estos pueden ser finalizados o manufacturados localmente. Por lo tanto, se decidió enfocar el presente trabajo, en determinar la viabilidad de los procesos de refuerzo y/o manufactura de puntas para excavadora.

Para ello, se aplicará conocimientos adquiridos en las áreas de caracterización materiales, mediante ensayos de dureza, micrografía, espectrometría de chispa y tratamiento térmico, para determinar el material de fabricación, su dureza, microestructura y que tipo de tratamiento térmico fue realizado en su manufactura. Luego se continuará con el estudio y desarrollo de tres tipos de refuerzos: soldadura de arco eléctrico, varilla de aporte de “WC en matriz de níquel” (carburos de orden milimétrico) y termorociado por flama con polvos de “WC en matriz de aleación de Ni” (carburos de orden micrométrico).

Finalmente se realizarán pruebas de campo y análisis de costos para determinar si la producción y/o refuerzo de puntas en el Ecuador son procesos viables para ejecutar.

1. Introducción

El cambio en la matriz productiva que impulsa el gobierno nacional, ha motivado a varias industrias a encontrar nuevas soluciones para las necesidades actuales del país, una de ellas se enfoca en potenciar la manufactura, recuperación y reforzamiento de superficies de herramientas de corte para maquinaria pesada, mejor conocidas como “puntas”. Para lo cual, se ha realizado la siguiente investigación, cuyo objetivo es determinar los materiales, propiedades y métodos de manufactura de puntas, definir si su producción es o no viable para ser ejecutada en Ecuador y estudiar tres refuerzos duros, que provean de resistencia al desgaste abrasivo a las puntas, mediante ensayos de laboratorio y pruebas de campo.

Las puntas son repuestos de alta rotación necesarios para las industrias: agrícola, minera y de la construcción. Estas, pueden ser construidas, reconstruidas o recubiertas dentro del país mediante procesos técnicos, que permitan alcanzar desempeños elevados, beneficios económicos para el fabricante, ahorro para el consumidor y reducción de salida de divisas por volumen de importación de repuestos. Conjuntamente, estos elementos de desgaste presentan diferencias de materiales, estructura, composición y recubrimientos según el fabricante, por lo cual es indispensable realizar un estudio que revele estas características, que servirán para determinar si es conveniente producirlas o si no.

Entre las puntas más vendidas en el Ecuador, se encuentran las montadas en equipos como Volvo ECR305Cl, Caterpillar 320D o Komatsu PC130-8, ya que son los equipos de mayor población a nivel nacional y que tienen una potencia promedio de 138 hp. (Caterpillar, ecuatorian dealer) Además, el precio de venta de estas puntas oscila entre \$18 y \$170, dependiendo de su tamaño y recubrimiento. Los equipos mencionados anteriormente, pueden ejercer una fuerza máxima de 137.5 KN (F_{max}) en su cucharón (CATERPILLAR, 2007). Esta fuerza genera esfuerzos mecánicos de compresión, flexión y corte en la punta, la cual, en condiciones ideales, trabaja como una “viga en voladizo”.

Para comprender de mejor manera lo expuesto anteriormente, a continuación se observa la Figura 1, en donde se presenta el análisis de elementos finitos generado en ANSYS R16.0 para determinar el esfuerzo de VON MISES y estudiar su impacto en la punta como elemento aislado. El caso más crítico se desarrolla cuando una sola punta soporta toda la

fuerza ejercida por el equipo, razón por la cual se realizará el análisis basado en una de ellas. (F. Geu Flores, A. Kecskemethy, A. Pottker, 2007) (Juan Andrade Cetto, Antii J. Koivo, 2005). Adicionalmente el ANEXO 1 presenta imágenes más detalladas del cálculo de esfuerzos en ANSYS R16.0.

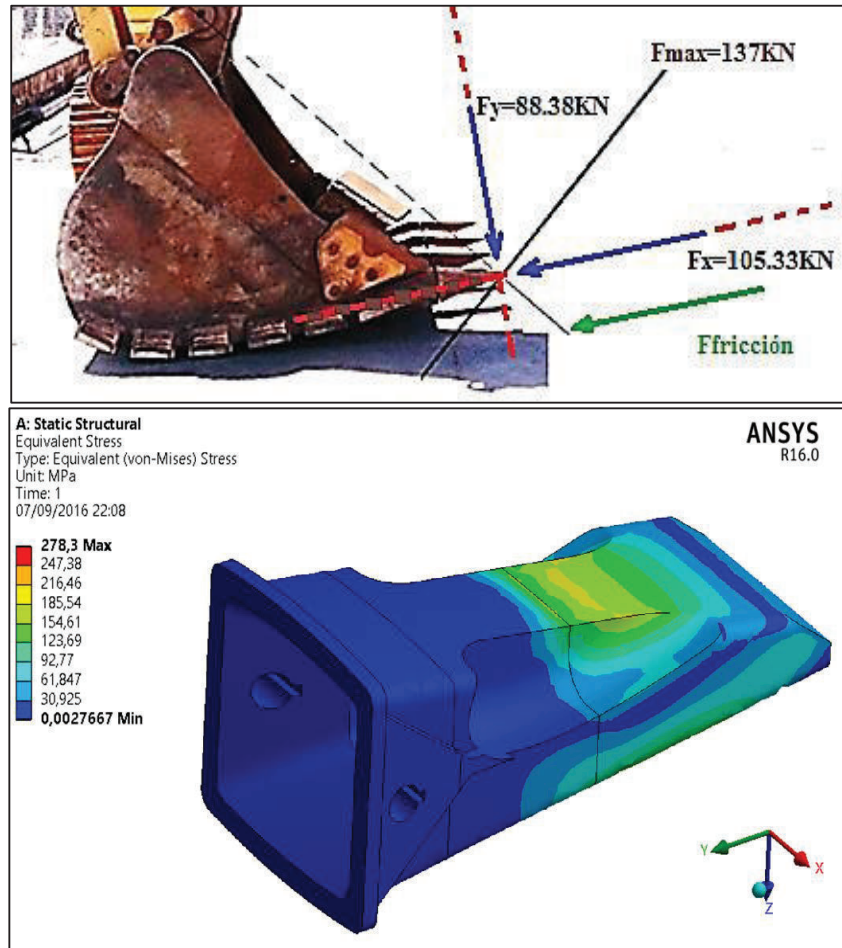


Figura 1.- Análisis de elementos finitos generado en el software ANSYS R16.0 aplicando una fuerza de 137.5 KN en el extremo de la punta.

Como podemos observar en la figura anterior, la punta soportará un esfuerzo máximo de 278.3 MPa en la zona central 278.3 MPa en la zona central donde se sobreentiende que trabaja en voladizo, asumiendo que el acoplamiento con el que el acoplamiento con el adaptador es perfecto en el montaje. Una vez que se ha obtenido el resultado de esfuerzo obtenido el resultado de esfuerzo máximo generado a la punta, es necesario citar las propiedades mecánicas del acero propiedades mecánicas del acero AISI S2 en la

Tabla 1, para que puedan ser comparadas.

Tabla 1.- Propiedades mecánicas teóricas del acero AISI S2. (MatWeb, 1996-2016)

Propiedad	AISI S2
Dureza, Rockwell C	55
Resistencia a la tracción última	2150 MPa
Límite de fluencia	2000 MPa
Módulo de corte	80.0 GPa

Es evidente que los valores de resistencia última y límite de fluencia del acero AISI S-2, son superiores a los esfuerzos a los cuales estará sometida la punta, lo que nos indica que el material del cual están fabricadas, es apto para soportar los esfuerzos existentes en el trabajo de las mismas. Adicionalmente se sabe que los aceros tipo S, aleados principalmente con manganeso silicio y cromo, tienen un límite elástico elevado, alta tenacidad y resistencia al desgaste media. (ASM International, 2008) Siendo estas, características importantes para alcanzar un desempeño elevado en aplicaciones como movimientos de tierras o minería.

En la actualidad existen dos procesos para la manufactura de puntas, se las puede obtener por fundición o forja (H&L Tooth Company) La fundición es un proceso que ha dejado de ser utilizado, ya que por la forja se obtienen puntas con prestaciones más elevadas. El proceso por forja parte de aplicar alrededor de catorce pasos de compresión a una barra caliente hasta obtener la forma requerida, luego de lo cual se retiran los excesos y se somete la punta a tratamiento térmico. Por otro lado, cabe mencionar que, este proceso de manufactura no se reprodujo en este estudio por falta de equipos de forja de esas características.

La designación AISI S2 fue seleccionada en función de la composición química encontrada en el acero de las puntas estudiadas en este trabajo y que servirá de base para el desarrollo del mismo. Es importante mencionar, que el acero AISI S2 posee en su composición aleantes como: Silicio, Manganeso y Cromo principalmente, los cuales le proporcionan resistencia al impacto, a la abrasión y corrosión, características importantes que deben poseer las puntas para alcanzar una vida útil elevada. (Ichiro TSUKATANI, Shun'ichi HASHIMOTO & Tsuyoshi INOUE, 1991)

Lastimosamente, la información sobre este tema es limitada en nuestro país, y puesto que la producción de este repuesto es inexistente, se desconoce acerca de sus propiedades y procesos de fabricación, lo que imposibilita realizar trabajos de recargue o manufactura de forma técnica, por lo cual, se genera la necesidad de aplicar un proceso de ingeniería inversa que vislumbre las propiedades de estos materiales, para analizar la factibilidad de finalizarlas, recuperarlas o manufacturarlas en el país.

El desarrollo del presente trabajo inicia con la caracterización de tres puntas de diferentes marcas comerciales, a las cuales se les aplica ensayos de dureza, metalografía y espectrometría de chispa; consecutivamente se realizan tratamientos térmicos, hasta obtener la microestructura y dureza originales de fábrica. Posteriormente, a tres probetas de acero, se les aplica tres tipos de refuerzos: por soldadura, varilla de aporte de carburo de tungsteno y termorociado. Una vez obtenidas las probetas, estas son sometidas a ensayos de dureza y micrografía, para observar los cambios microestructurales provocados por el proceso de recargue. Subsecuentemente, a las probetas recargadas, se les aplica tratamiento térmico, para recuperar las características originales del acero. Luego de identificar el proceso de manufactura con el tratamiento térmico y refuerzo de los materiales, se somete a pruebas de campo a cuatro puntas, tres recargadas con los refuerzos descritos anteriormente, y una original; para finalmente, determinar la factibilidad de la aplicación de dichos refuerzos, realizando el análisis respectivo.

Palabras clave: puntas de excavadora, desgaste abrasivo, carburo de tungsteno, suelda, termorociado, tratamiento térmico.

2. Materiales y Métodos

En este apartado se detalla todos los materiales y procedimientos utilizados para la caracterización de materiales base y recubrimientos, así como también los procesos tecnológicos utilizados para estos últimos. Se inicia describiendo el proceso de ingeniería inversa que descifra los materiales y métodos de manufactura y los refuerzos de tres tipos de puntas, a las cuales, se las ha nombrado como A, B y C sin un orden particular. Complementariamente, se debe conocer que la procedencia de la muestra A es inglesa, la B española y la C china.

2.1. Caracterización de los materiales originales

Para conocer la composición química, la dureza y la microestructura de los materiales originales, fue necesario realizar varias pruebas de laboratorio, los cuales se describen en la parte inferior y son: Ensayo de dureza, Ensayos de micrografía, Espectrometría de chispa y Tratamiento térmico. A continuación se presentan los materiales y el método utilizado en cada uno de ellas.

2.1.1. Ensayos de dureza de los materiales originales

Se inicia el proceso de ingeniería inversa extrayendo muestras de los aceros con una cortadora de disco y líquido refrigerante, para evitar la alteración de la microestructura del material debido al incremento de la temperatura al realizar el corte. A las muestras extraídas se las sometió a ensayos de dureza Rockwell C, realizando cinco indentaciones para obtener un valor promedio y reducir el error estadístico, para lo cual se utilizó un equipo análogo de marca MITUTOYO modelo DT-10 y un indentador punta de diamante.

2.1.2. Ensayos de micrografía de los materiales originales

Posteriormente, se obtuvieron metalografías de las tres muestras, aplicando un proceso de pulido con lijas de desbaste número 60, 120, 240, 320, 400 y 600. Luego, con el equipo MetaServ 250 marca Buehler, se pulieron las muestras con suspensiones policristalinas de

diamante de 9, 3 y 1 μm , además se hizo uso de alúmina de 0.5 μm para el acabado final. También se utilizó alcohol etílico al 89% y una secadora de aire frío para limpiar las piezas durante este proceso.

Debido a que, hasta ese momento no se identificaba la composición del material, se decidió realizar el ataque químico a los aceros A, B y C con Nital al 10%, para observar la microestructura de los aceros en un ensayo prueba-error. Así, el ataque químico tuvo una duración de tres minutos para el material A, un minuto y medio para el B y un minuto para el C. Posterior al ataque químico, el Nital fue retirado mediante la limpieza de las muestras con agua destilada, y secándolas con aire frío. Inmediatamente, las muestras fueron analizadas en un microscopio OLYMPUS GX41 con aumentos de 100X y 500X.

2.1.3. Espectrometría de chispa a los materiales originales

Para conocer la composición química de las puntas se sometió a cada muestra a ensayos de espectrometría de chispa en atmósfera de argón. El equipo utilizado para este ensayo fue de marca BRUKER modelo Q4TASMAN, del cual se obtuvieron los valores cuantitativos de la composición química de cada acero. Estas composiciones fueron comparadas con varias tablas de designación existentes, siendo la AISI-S2 la más cercana a la de los aceros estudiados. Esta información sirvió como punto de partida para realizar los ensayos de tratamiento térmico presentados en el siguiente apartado. Las imágenes del proceso de caracterización de materiales se muestran en el ANEXO 2.

2.1.4. Tratamiento térmico de recocido y de Temple + Revenido del material original

Una vez que se ha realizado la micrografía del material, es momento de aplicar un tratamiento térmico al acero, que permita obtener la misma microestructura del material original. Para ello, se tomó como base el procedimiento para aceros AISI-S2 (ASM Internacional, 1995), el cual generó el diagrama de procesos mostrado en la Figura 2. Previo a realizar los ensayos de tratamiento térmico fue necesario llevar al material a un estado de austenización aplicando normalizado, para lo cual, se calentó el acero “muestra

C” a 1000°C y se lo dejó enfriar dentro del horno durante 15 horas aproximadamente. El horno utilizado para estos ensayos fue de marca Carbolite, modelo CWF 1300.

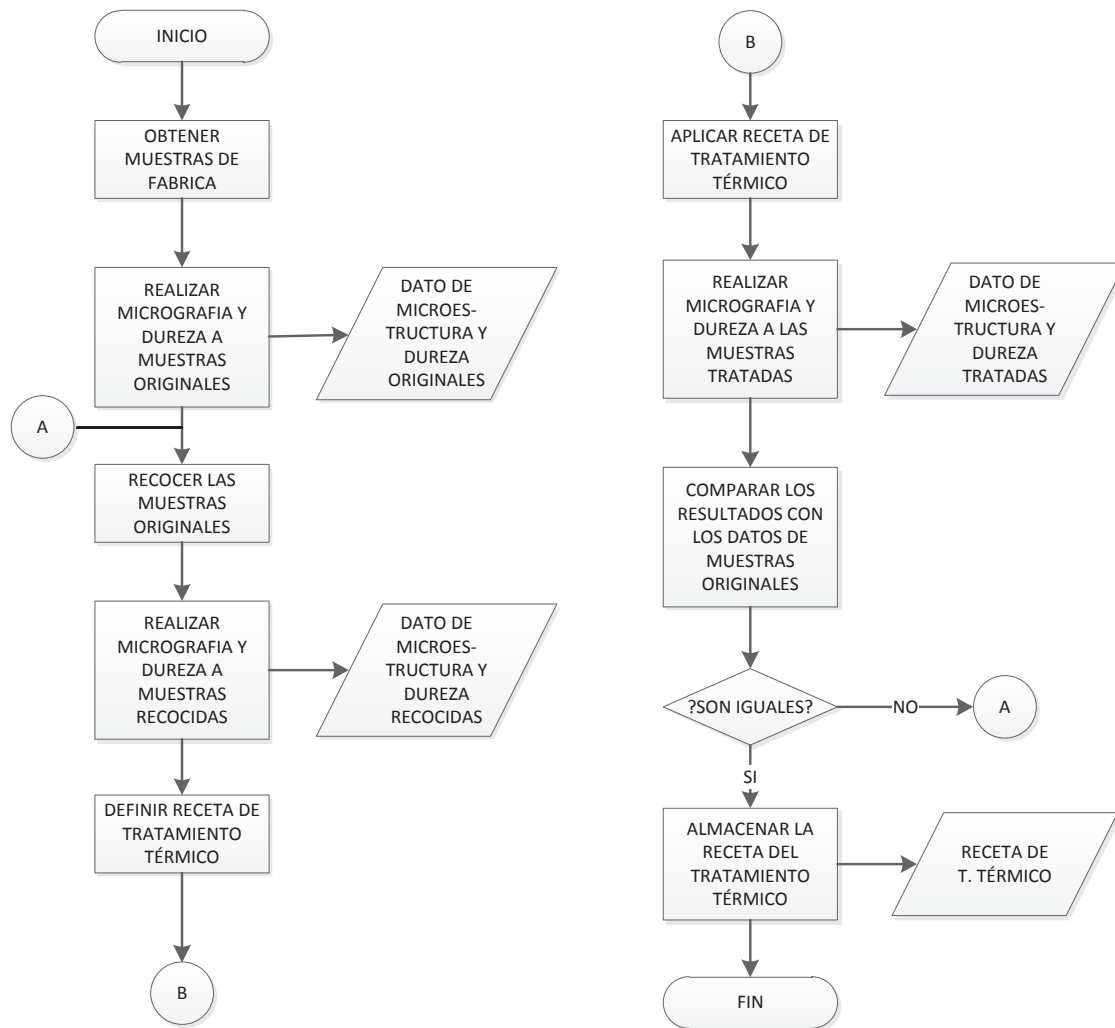


Figura 2.- Diagrama de flujo usado para determinar el tratamiento térmico del acero de las puntas de retroexcavadora.

Con el tratamiento propuesto por (ASM Internacional, 1995) para aceros AISI-S2, se obtuvo una microestructura diferente a la esperada, y una dureza inferior a la original. Por lo cual, fue necesario repetir el proceso en dos ocasiones, hasta obtener una microestructura y dureza más semejante al original.

2.1.4.1. Primer ensayo de tratamiento térmico de Temple + Revenido al material original

El primer ensayo de tratamiento térmico consta de tres etapas: alivio de tensiones, temple y revenido. A continuación se detalla el proceso de cada una de ellas, y posteriormente, en la Figura 3 se resume la primera receta aplicada al material.

- ✓ **Alivio de tensiones:** Una vez que la pieza se encontraba dentro del horno, se elevó la temperatura del mismo a 660°C a una tasa de 42°C por minuto. Transcurrida una hora a esta temperatura, se procedió a sacar la pieza del horno, para dejarla enfriar a temperatura ambiente.
- ✓ **Temple:** Luego del alivio de tensiones, se precalentó el horno a 650°C, se introdujo la muestra e inmediatamente se elevó la temperatura a 860°C con un incremento de 14°C por minuto. Dicha temperatura se mantuvo durante 20 minutos, y finalmente, se templó el acero en agua fría estática a 10°C.
- ✓ **Revenido:** 20 minutos después del temple, se colocó la muestra dentro del horno a 440°C, se mantuvo durante una hora y se dejó enfriar al aire. Posteriormente, se realizaron ensayos de dureza y micrografía a la muestra tratada.

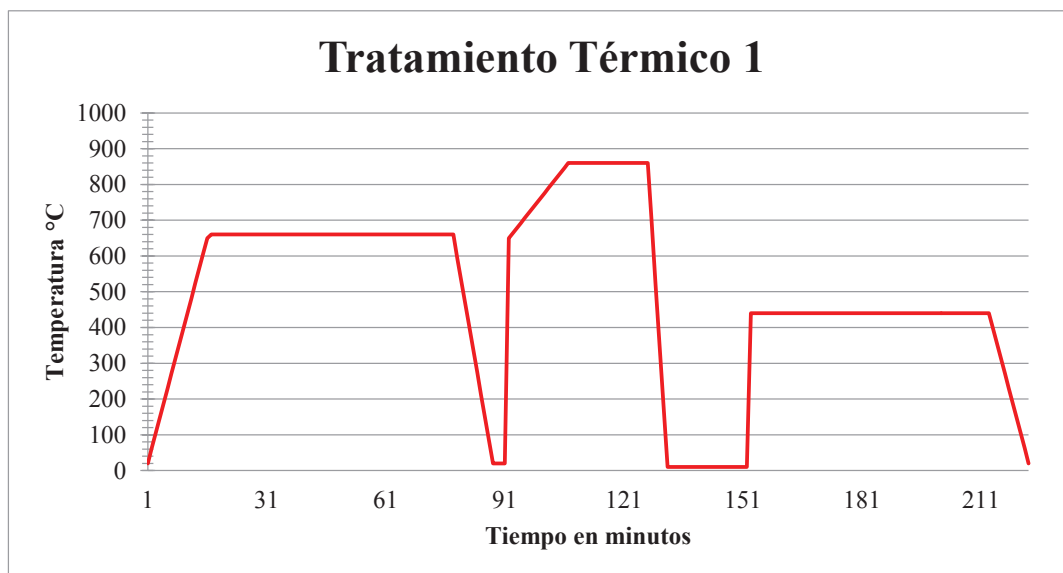


Figura 3.- Diagrama Tiempo-Temperatura del primer ensayo de tratamiento térmico.

Una vez realizado el proceso y examinadas las piezas, surgió la necesidad de realizar un segundo ensayo con una nueva receta, ya que los valores obtenidos, no fueron los esperados. Por lo tanto, el nuevo proceso, ensaya una temperatura de temple más elevada y una temperatura de revenido inferior a la del primer ensayo.

2.1.4.2. Segundo ensayo de tratamiento térmico de Temple + Revenido al material original

Este ensayo busca incrementar el valor de dureza en el acero, afinando la receta de tratamiento térmico para acercarse más a los valores obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras originales. Para lo cual, fue necesario, normalizar el material previo a ejecutar el siguiente procedimiento, el mismo que se encuentra explicado en la Figura 4.

- ✓ **Alivio de tensiones:** Se siguieron los mismos pasos del alivio de tensiones descrito en el apartado **2.1.4.1**.
- ✓ **Temple:** Luego del alivio de tensiones, se precalentó el horno a 650°C, se introdujo la muestra e inmediatamente se elevó la temperatura a 900°C con un incremento de 12°C por minuto. Dicha temperatura se mantuvo durante 20 minutos, y finalmente, se templó el acero en agua fría agitada a 5°C.
- ✓ **Revenido:** 10 minutos después del temple, se colocó la muestra dentro del horno a 380°C, se mantuvo durante una hora y se dejó enfriar al aire a temperatura ambiente (20°C aproximadamente). Posteriormente, se realizaron ensayos de dureza y micrografía a la muestra tratada.

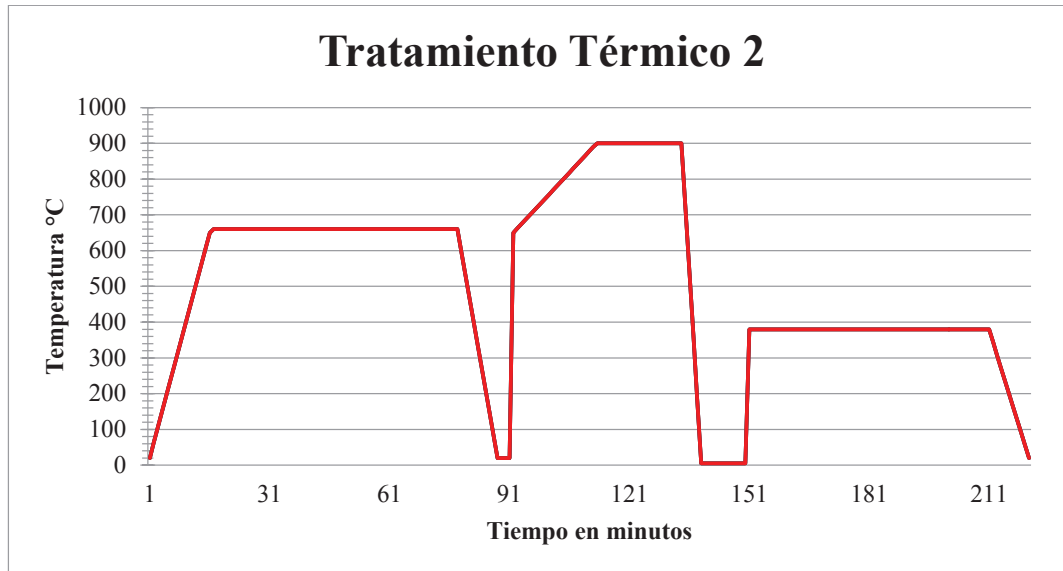


Figura 4.- Diagrama Tiempo-Temperatura del segundo de tratamiento térmico.

Del segundo ensayo de tratamiento térmico se obtuvieron valores de dureza y microestructura más cercanos a los esperados. La dureza se midió con un equipo de marca Wilson Hardness, modelo Rockwell 574 y un indentador punta de diamante. La micrografía se realizó aplicando el proceso de pulido antes descrito y ataque químico basados en la norma ASTM E407-07; se clasificó a las muestras como acero de herramienta y se las atacó con el compuesto 110 (10mL HCL, 5mL HNO₃ y 85mL etanol (95%)) mencionado en dicha norma. Cada material fue atacado en varias ocasiones hasta alcanzar el resultado esperado, por lo cual no se ha definido un tiempo exacto de exposición al compuesto. En esta ocasión, los equipos utilizados fueron: BUEHLER HandiMet2 para el desbaste, BUEHLER MetaServ 250 y un microscopio Nikon Eclipse MA200. Es importante mencionar que en el ANEXO 3 se encuentran las imágenes de los procesos de tratamientos térmicos, ensayados en los aceros aplicados en el material original.

2.2. Refuerzo de las puntas con recargue duro

Hasta el momento se ha realizado la caracterización completa de los materiales originales. Ahora, este apartado, tiene como objetivo estudiar tres procesos de refuerzo, los mismos que se explican detalladamente en la parte inferior en el siguiente orden: por soldadura de

arco eléctrico, por termorociado y por varilla de aporte de carburo de tungsteno. Asimismo, se estudia la afectación térmica que sufren los materiales base y la aplicación del tratamiento térmico a los aceros recargados. Cabe mencionar, que antes de reforzar las muestras, fue necesario retirar la capa de pintura existente en las mismas.

2.2.1. Refuerzo por soldadura de arco eléctrico

Para esta aplicación se utilizó electrodos de clasificación DIN 8555: E6-UM-65-GRZ, con una dureza de 65 HRC, superior a los 49 HRC promedio del material de las puntas y cuya composición química se encuentra detallada en la Tabla 2. Complementariamente, se usó un equipo RED-O-ARC E300 a 160 V para realizar la soldadura.

Inicialmente, se precalentó la pieza a 600 °C durante un minuto. Luego, se aplicó la capa de suelda con 160V DC, este proceso tuvo una duración de 10 minutos para cubrir un área de 12 cm². Una vez que se soldó cada cordón, fue necesario retirar la escoria con un martillo y cepillo de acero. Finalmente, luego del recargue, la pieza se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Tabla 2.- Composición química del electrodo E6-UM-65-GRZ. Fuente: KESTRA UNIVERSAL SOLDAS INC.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	C	Cr	Mo	Nb	V	W	Fe
	5.0	22.0	8.0	8.0	1.0	2.0	balance

Es fundamental aclarar que el electrodo E6-UM-65-GRZ fue seleccionado para este estudio, debido a su propiedad de alta resistencia al desgaste abrasivo. Por lo tanto, en el ANEXO 4 se muestra la ficha técnica del electrodo mencionado y utilizado en este proceso. Como dato adicional se menciona que el material del electrodo tiene un coeficiente de expansión térmica lineal de 7.00 - 13.9 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, este dato será utilizado posteriormente en el capítulo de discusión. (MatWeb, 1996-2016)

2.2.2. Refuerzo con varilla de aporte de carburo de tungsteno

El carburo de tungsteno posee una dureza entre 1300 a 2200 HV, y no solo es un material muy resistente al desgaste abrasivo, sino que además, es un refuerzo utilizado actualmente en un grupo especial de puntas (MatWeb, 1996-2016). Estas razones, han llevado a la

selección de la varilla de aporte de carburo de tungsteno para realizar el presente estudio, sumado a que se desconoce acerca del proceso de refuerzo realizado con este material. Debido a ello, a continuación se detalla el proceso experimentado.

Inicialmente, se precalentó la pieza a 600°C aproximadamente, luego se colocó una base de polvo MESSER MG FUSE KOTE 1030 para asegurar la adherencia del refuerzo. Inmediatamente, se depositó el recargue de varilla de carburo de tungsteno, pero esta vez con polvo MESSER MG FUSE KOTE 1070, para evitar porosidades. Este proceso tardó un minuto y medio para cubrir 12 cm² de la muestra.

2.2.3. Refuerzo por termorociado con polvos de carburo de tungsteno en base de níquel

El termorociado no es un proceso comúnmente aplicado en puntas de excavadora, razón por la cual se decidió experimentar y estudiar su desempeño como alternativa a los anteriores procesos de refuerzo. Para este caso, se utilizó polvos de Níquel como base y polvos de carburo de tungsteno como recargue duro, que a diferencia de los carburos de la varilla de aporte, estos presentan dimensiones inferiores. La composición química de los polvos 1030 y 1070 se muestran en la Tabla 3, y el procedimiento ensayado en el presente trabajo se describe a continuación.

Inicialmente, y al igual que el caso anterior, se precalentó la pieza a 600°C aproximadamente, luego se colocó una base de polvo MESSER MG FUSE KOTE 1030 e inmediatamente se depositó el recargue, pero esta vez solo con polvo MESSER MG FUSE KOTE 1070, donde se estima que la pieza alcanzó los 900°C. Todo el proceso tardó cuatro minutos y medio para cubrir un área de 12cm² del acero original.

Tabla 3.- Composición química de los polvos de MESSER 1030 y 1070. Fuente: <http://www.messerwelding.com/>

COMPOSICIÓN QUÍMICA	Fe	Cr	Ni	Si	Br	C	WC
1070	1-10%	10-20%	30-0%	1-10%	1-10%	0.1-1%	40-50%
1030	0.1-1%	1-10%	80-90%	1-10%	1-10%		

Es importante conocer que la dureza aproximada del polvo MESSER 1070 es de 63 HRC en la matriz de Níquel y de 70 HRC en los carburos de tungsteno, mientras que el polvo de MESSER 1030 puede presentar una dureza entre 37 a 40 HRC (MESSER MG Welding Products, 2014) ya que estos valores serán de utilidad al estudiar la afectación y tratamientos térmicos a los que las piezas recargadas deberán ser sometidas.

Cada muestra reforzada fue cortada con disco y refrigeración líquida, para realizar ensayos de dureza y micrografía que revelen los cambios sufridos durante el proceso de recargue. El ensayo de micrografía fue el mismo que el descrito en los ensayos de tratamiento térmico realizados al material original, con la diferencia que esta ocasión se atacó a los aceros con Nital al 3%. Luego de observar las muestras en el microscopio, se realizó un barrido de durezas para visualizar la Zona Afectada por el Calor (ZAC) de las tres muestras recargadas. El equipo utilizado para medir las durezas fue un durómetro Wilson Hardness ROCKWELL 574 y un indentador punta de diamante.

El barrido de durezas sirvió para generar mapas de contorno, los cuales revelaron las ZAC presentes en las muestras recargadas. Esto generó la necesidad de aplicar tratamiento térmico, para recuperar las propiedades originales del material recargado. En consecuencia, se decidió aplicar la receta del apartado **2.1.4.2.** a las puntas recargadas. Finalmente, se analizaron los cambios, realizando mapas de contorno de las muestras recargadas y tratadas.

El ANEXO 4 y ANEXO 7, muestran evidencia del proceso de recargue y tratamiento térmico de las muestras reforzadas. Estos procesos servirán para ser aplicados posteriormente en la producción de puntas para las pruebas de campo.

2.3. Producción y pruebas de campo de las puntas recargadas

Para obtener un dato comparativo de rendimiento de los refuerzos estudiados, fue necesario realizar una prueba de campo. Para lo cual, se reforzaron tres puntas de acero “C” con los procesos descritos en la sección **2.2.** Cabe recalcar que cada punta fue cubierta con aproximadamente 12 cm^2 de recargue duro.

Se dispusieron cuatro puntas (tres recargadas y una original “C”), montadas en los adaptadores centrales de un cuchararón para 6 puntas, como se ilustra en la Figura 5, de esta forma, se evitó que éstas trabajen al extremo del cucharón, sitio donde se produce un desgaste acelerado. Esta prueba tuvo lugar en una mina de material pétreo, localizada en el sector de San Antonio de Pichincha, al noroccidente de Quito.



Figura 5.- Montaje de las cuatro puntas para la prueba de campo en un cucharón de una excavadora CATERPILLAR 320D con seis adaptadores.

Se puede apreciar la disposición de las puntas en el cucharón, si bien, ninguna de las puntas a prueba se encuentra en los bordes, todas tendrán una diferencia de aplicación de carga y por ende se desgastarán desigual. Otro factor a considerar es la alineación horizontal que éstas tengan ya que esto podría ser una variable que ocasione el desgaste prematuro de alguna de ellas, para nuestro caso si bien la alineación no era perfecta todas estaban dentro de una desviación normal.

3. Resultados

3.1. Resultados de la caracterización de los materiales originales

Luego de realizar el proceso de ingeniería inversa en los materiales originales, se ha obtenido la información que a continuación se presenta. Ésta revela las propiedades de dureza, microestructura, composición química y tratamiento térmico de los aceros originales, para determinar un posible método de manufactura.

3.1.1. Resultados de los ensayos de dureza de los materiales originales

Una vez realizados los ensayos de dureza de los materiales originales A, B y C se obtuvieron los valores que se presentan en la Tabla 4. Estos valores sirvieron para calcular el promedio de dureza y la desviación estándar de las medidas tomadas.

Tabla 4.- Promedio y desviación estándar de las medidas de dureza HRC de las muestras A, B y C. Fuente: Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, Escuela Politécnica Nacional (LAEV – JUL98.15).

Muestra	Mediciones en escala Rockwell C					Promedio	Desviación Estándar
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5		
A	50.5	49.5	49	49.5	50	49.7	0.57
B	48.5	48	47	48	48.5	48	0.61
C	50.5	49	48	48.5	49	49	0.93

Es importante mencionar que las medidas tomadas grafican una diagonal sobre la superficie de las muestras, es decir, se midió la dureza tanto en los bordes como en el centro, tomando en cuenta que la forma de las muestras era rectangular, tal como se indica en la Figura 6. Como se puede observar, la dureza en los tres materiales es ligeramente mayor, superficialmente (Medida 1 y Medida 5), y menor en el centro (Medida3) de acuerdo a lo mencionado por (ASM Internacional, 1995), donde se ha verificado que la dureza de los materiales tratados térmicamente disminuye su valor a medida que se aleja de la superficie. De lo cual, resulta un material duro en la superficie pero resistente en su interior, lo que impide que sea frágil a pesar de ser duro en el exterior.

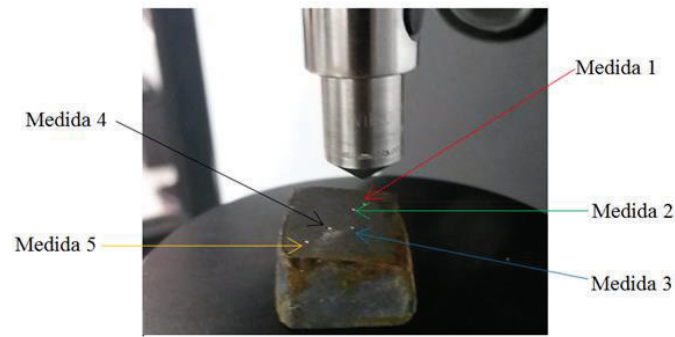


Figura 6.- Forma de medición de la dureza de las muestras A, B y C.

Por otro lado, el cálculo de la desviación estándar revela que el material A presenta una estructura más homogénea que las muestras B y C, en otras palabras, la dureza del material A varía menos tanto en los bordes como en el centro, al contrario de las muestra C, donde su dureza varía en mayor proporción. Esto podría determinar una diferencia de calidad basada en la profundidad del tratamiento térmico de cada muestra.

3.1.2. Resultados de los ensayos de micrografía de los materiales originales

La micrografía realizada a las tres muestras revela una microestructura similar para todos los casos, pero presentan diferencias en cuanto a cantidades y morfología de sus precipitados. Las tres microestructuras son martensita y bainita acicular, debido al temple y revenido en las puntas, las cuales se muestran en la Figura 9 10.

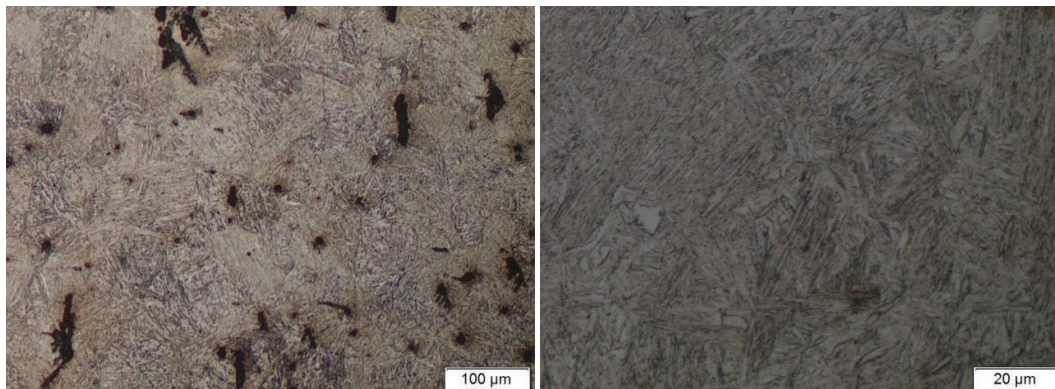


Figura 7.- Micrografía a 100X y 500X de la muestra A atacada con Nital al 10%. Se observa bainita acicular, martensita y precipitados de carburos metálicos (posiblemente SiC, CrC, o similares) en forma de hojuelas, condición original de compra. (ASM International, 2002)

En la Figura 7 se puede observar que el material A posee una estructura martensítica-bainítica, con precipitados de carburos típicos de aceros S2 como Carburo de Silicio, Carburo de Cromo, Carburo de Molibdeno, etc. Para determinar la composición de los precipitados fue necesario realizar un ensayo de EDS el cual se muestra en la Figura 8.

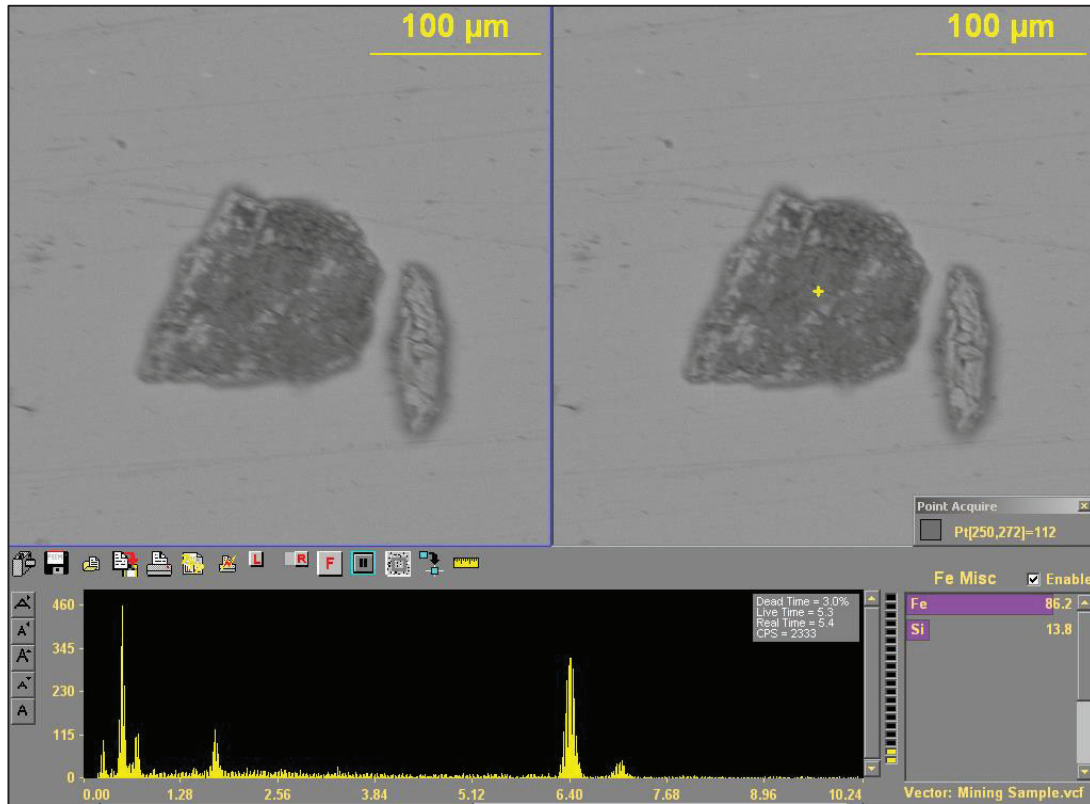


Figura 8.- EDS realizado a la muestra A. Se observa presencia de hierro y silicio sobre el punto de análisis.

Se presume que estos precipitados contienen carbono y metales según sugiere el ensayo de EDS del microscopio de barrido electrónico, ya que el ensayo está limitado a detectar la presencia de metales únicamente.

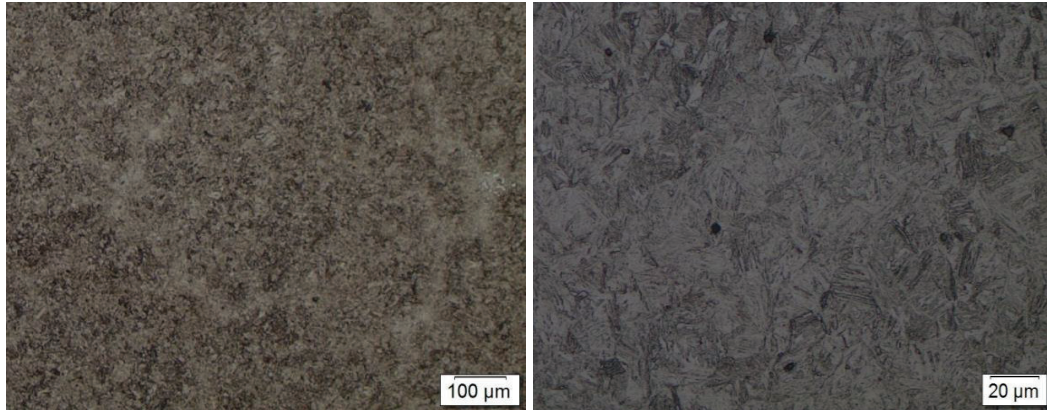


Figura 9.- Micrografía a 100X y 500X de la muestra B, atacada con Nital al 10%. Se observa bainita acicular, martensita, Condición original de compra. (ASM International, 2002)

En la micrografía del material B se observa nuevamente una estructura de bainita acicular y martensita, pero sin presencia de precipitados de carbono. Por lo que se asume que en la manufactura de este acero, el revenido es realizado en menor tiempo o menor temperatura, impidiendo que los átomos de carbón formen precipitados.

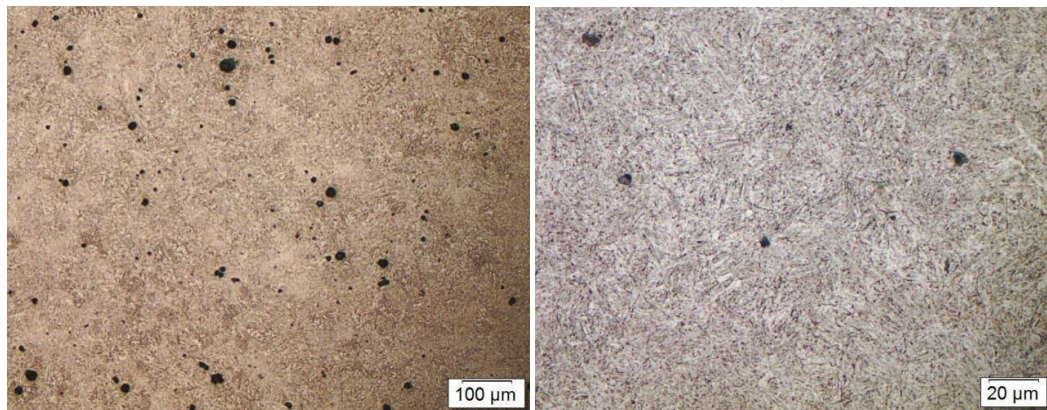


Figura 10.- Micrografía a 100X y 500X de la muestra C, atacada con Nital al 10%. Se observa una microestructura de martensita acicular y nódulos de carburos, condición original de compra.

Finalmente, la micrografía del material C, si bien presenta una estructura martensítica acicular como en los aceros A y B, en ésta se visualizan precipitados de carburos en forma de nódulos, los cuales aparecen como manchas en la superficie y que se forman en el revenido, donde al material se le proporciona la energía suficiente de agrupar este compuesto antes de que forme precipitados más grandes como en el acero A.

3.1.3. Resultados de la espectrometría de chispa a los materiales originales

El análisis de espectrometría de chispa bajo atmósfera de argón, arrojó los datos porcentuales de composición química de los materiales A, B y C presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química de las muestras A, B y C obtenidas del análisis por espectrometría de Chispa con atmósfera de argón. Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva, Escuela Politécnica Nacional (RM-8299, 04/09/2015).

Metales	A (%)	B (%)	C (%)
Hierro (Fe)	94.47	95.27	95.6
Silicio (Si)	2.33	1.41	1.01
Manganeso (Mn)	1.45	1.03	1.1
Cromo (Cr)	0.62	1.39	1.43
Carbono (C)	0.38	0.28	0.33
Molibdeno (Mo)	0.19	0.04	0.02
Níquel (Ni)	0.1	0.07	0.03
Azufre (S)	0.06	0.04	0.04
Plomo (Pb)	0.05	0.09	0.07
Cobre (Cu)	0.03	0.02	0.02
Aluminio (Al)	0.02	0.05	0.06
Magnesio (Mg)	0.02	0.02	0.01
Cerio (Ce)	0.02	0.02	0.02
Fósforo (P)	0.01	0.01	0.01

Los tres materiales resultaron ser aceros hipoeutectoides al contener menos del 0.8% de carbón en su composición química, tal como se menciona (Molera Solá, 1991), con presencia de Si, Mn, Cr, y Mo, como aleantes principales. Estos elementos aleantes cumplen funciones importantes en estos materiales, modificando sus propiedades mecánicas, al incrementar su resistencia última e incluso modifican su diagrama isotérmico desplazando la curva de inicio de ferrita hacia la derecha y hacia arriba, tal como se muestra en la Figura 11.

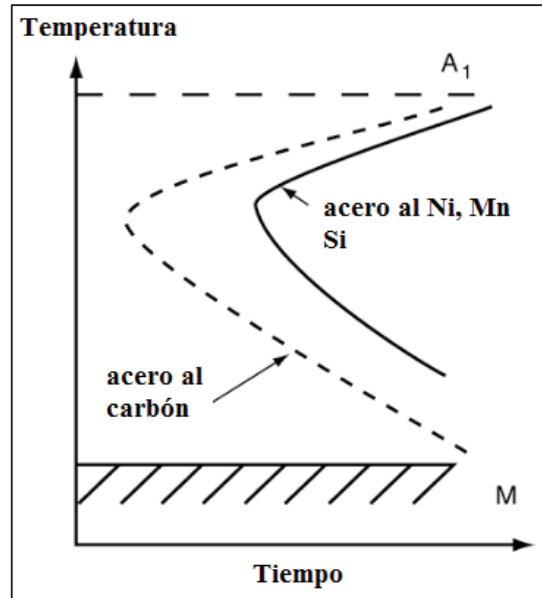


Figura 11.- Diagrama de precipitación isotérmica de la austenita, curva del acero al carbono y de acero aleado con Ni, Mn y Si. Tomado y traducido de: (George E. Totten, 1997)

Este cambio en el diagrama isotérmico es beneficioso ya que permite obtener una microestructura libre de ferrita de forma más sencilla, ampliando el rango de tiempo, en el que la temperatura debe reducirse hasta (Ms). Por otra parte, estos mismos elementos aleantes producen el descenso de la temperatura de formación de martensita (M del gráfico), lo que implicaría realizar el temple a temperatura más baja. (George E. Totten, 1997).

3.1.4. Resultados del tratamiento térmico de recocido y de temple + revenido del material original

Luego de observar la microestructura del material original, se realizaron varios ensayos de tratamiento térmico, los cuales pudieron ser comparados con la microestructura de fábrica, y de esta forma poder plantear un posible método de manufactura. El estudio realizado se enfocó en el acero “C”, ya que éste presenta un menor costo en el mercado, haciendo que sea más factible su reforzamiento con recubrimientos en el país, de tal forma que permita alcanzar un precio y desempeño competitivo junto a otras marcas comerciales.

Antes de ensayar los tratamientos térmicos, fue necesario llevar al acero a estado de austenización, aplicando recocido a la muestra, con el fin de observar los cambios en microestructura y dureza antes y después de dichos tratamientos térmicos. La Figura 12 muestra la microestructura del acero normalizado, donde se puede observar la formación de perlita y ferrita, producto de un enfriamiento lento del acero.

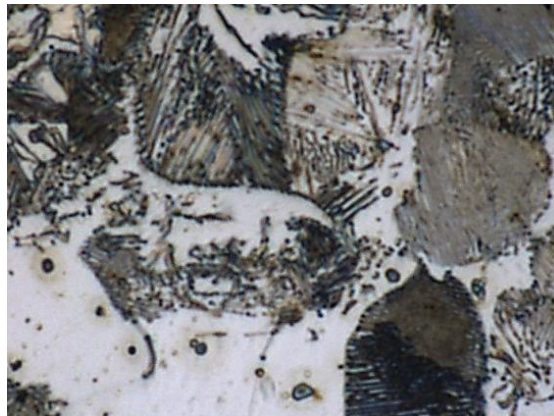


Figura 12.-Micrografía a 2000X de la muestra C atacada con Nital al 10% durante 4 minutos, luego de ser enfriada en horno durante 13 horas aproximadamente. Se observa la formación de ferrita y perlita.

Las fases que se observan en la Figura 12 corresponden a un acero de bajo contenido de carbono, calentado a temperatura de austenización y enfriado dentro del horno, donde los elementos tienen el tiempo y la energía necesaria para organizarse. Posterior al recocido, se ensayaron dos tratamientos térmicos de temple + revenido. El primer ensayo presentó una dureza 4.4 HRC por debajo del acero original, razón por la cual se elevó la temperatura de temple y se redujo la temperatura de revenido en el segundo tratamiento térmico. Con la segunda receta ensayada, se logró incrementar 1.7 HRC del resultado del primer tratamiento. La Tabla 6 muestra los valores de dureza en las muestras recocidas y tratadas por los dos métodos ensayados.

Tabla 6.- Durezas de las muestras recocidas y Templada + Revenida 1 y 2 de la muestra C.

Tratamiento Térmico	Escala	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio	Desviación estándar
Recocido	HRA	52.4	51.2	51.3	52.2	51	51.62	0.63
Recocido y temple + revenido 1	HRC	44.3	45.4	44.3	44.4	44.5	44.6	0.47
Recocido y temple + revenido 2	HRC	46.8	46.5	45.8	46.5	46	46.3	0.41

Se puede observar claramente el incremento de dureza producido por el temple y revenido en el acero. Si bien no se alcanzó el valor de dureza del material original (49 HRC) por limitaciones de técnicas, se estableció el camino a seguir para alcanzar dichos resultados. Adicionalmente, los ensayos de micrografía arrojaron los resultados que se presentan en la Figura 13, donde se pueden observar las diferencias entre el acero original y el acero al cual se le aplicó el tratamiento térmico de templado + recocido 2.

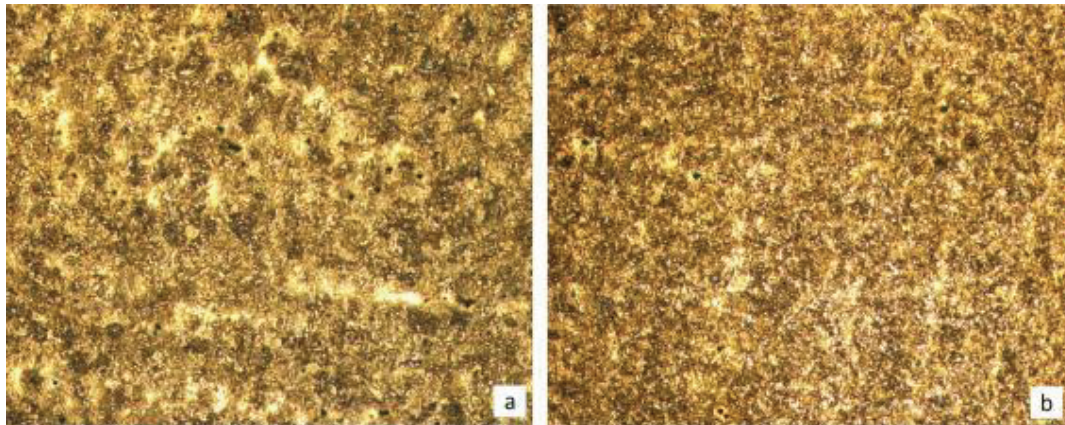


Figura 13.- Comparación micrográfica a 100X del acero C atacado con Nital al 3% durante 15. a) Acero "C" original, b) acero "C" recocido, templado + revenido 2.

Como se observa, la microestructura obtenida con el segundo ensayo de tratamiento térmico no es igual a la microestructura original. A pesar de que su forma es similar, el tamaño de las agujas no es el mismo. Es importante destacar que se consiguió producir los precipitados de carburos. Esta diferencia de resultados se debe a que el tratamiento térmico ensayado no es exactamente el mismo que se aplicó a los aceros originales por su fabricante.

3.2. Resultados del refuerzo de las puntas con recargue duro

Las micrografías de las muestras con recargue duro por medio de refuerzo con varilla de aporte de carburo de tungsteno, refuerzo por soldadura de arco eléctrico y refuerzo por termorociado con polvos de carburo de tungsteno, detallados en los apartados subsiguientes, revelaron la nueva microestructura formada por el calentamiento y enfriamiento propio de los procesos de recubrimiento. La superficie del material base que se adhiere al recubrimiento se recrystaliza, la microestructura pasa a formar granos grandes y se pierde la martensita y/o bainita según el caso. Los ensayos de micrografía y macrografía realizados en las muestras recargadas, revelaron la zona afectada por el calor (ZAC) que se puede observar en la zona “b” de la Figura 14 para los tres casos y que se genera al aplicar las capas de recubrimiento.



Figura 14.- Macrografías de las muestras recargadas con: varilla de aporte de carburo de tungsteno atacada con Nital al 10% durante 5 segundos, soldadura de arco eléctrico atacada con Nital al 10% durante 7 segundos, y con termorociado con polvos de carburo de tungsteno atacada con Nital al 10% durante 5 segundos. Se observan: a) zona templada al aire, b) ZAC y c) formación de estructura granular.

La Figura 14 muestra las tres zonas de recristalización (a, b y c), formadas por el enfriamiento del acero. La zona “a” alcanzó la temperatura máxima al momento de la aplicación del recargue y sufrió temple a temperatura ambiente. Por otro lado, la zona “b” o “ZAC”, es la zona de transición entre la formación granular presente en la zona “c” y la zona templada “a”. Finalmente, la zona “c” presenta una formación granular claramente visualizada en la macrografía.

3.2.1. Resultados del refuerzo con varilla de aporte de carburo de tungsteno

Luego de realizar la macrografía a la muestra recargada con varilla de aporte de carburo de tungsteno y observar la ZAC, fue necesario realizar un mapa de contorno de durezas, para evidenciar de forma más clara, la afectación sufrida por el material. En la Figura 15 se visualiza la ubicación de la ZAC en la muestra recargada considerando que el refuerzo se encuentra localizado sobre la parte superior izquierda del mapa.

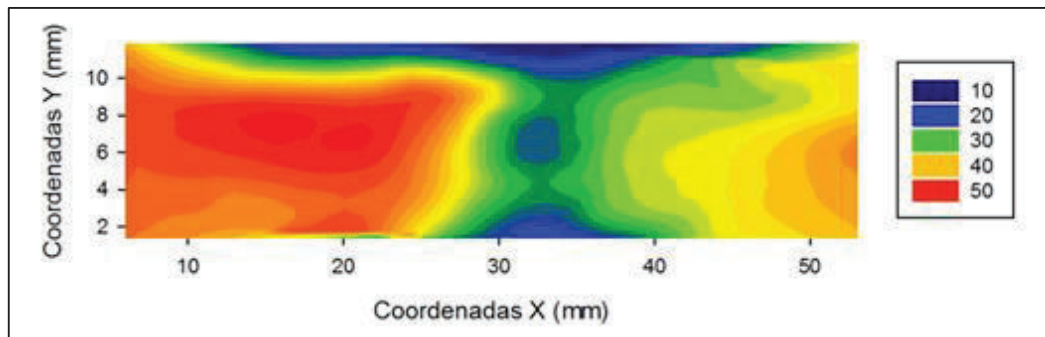


Figura 15.- Mapa de contorno de dureza en el material base luego de aplicar refuerzo con varilla de aporte de carburo de tungsteno, dureza medida en HRC.

Como se puede observar en el mapa de contorno, la zona bajo el refuerzo, conserva una dureza elevada; mientras que en la ZAC, que tiene aproximadamente 15 mm en la parte más ancha, la dureza cae a tal punto que no puede ser medida en escala HRC. Por último, la zona alejada del recargue incrementa su dureza, a medida que se aleja de dicho recargue. Es importante aclarar, que los valores perimetrales del mapa de contorno no fueron medidos, sino que son aproximados por el *software* en el que se realizó (SigmaPlot 13.0).

3.2.2. Resultados del refuerzo por soldadura de arco eléctrico

La aplicación de este refuerzo presentó varias fracturas en la zona del recargue, observadas al momento de realizar la microscopía de las muestras. Por otra parte, al igual que el caso anterior, a continuación se presenta el mapa de contorno de durezas en la Figura 16, para evidenciar de forma más clara, la afectación sufrida por el material en este tipo de ensayo. Hay que mencionar que el recubrimiento se localiza sobre la parte superior izquierda del mapa de contorno, donde la dureza ha aumentado.

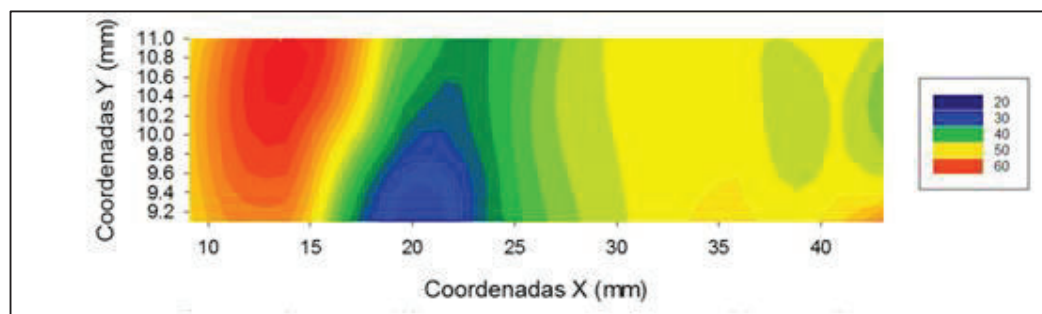


Figura 16.- Mapa de contorno de dureza en el material base luego de aplicar refuerzo por soldadura de arco eléctrico, dureza medida en HRC.

Observando la Figura 16 anterior podemos visualizar, nuevamente, una zona dura bajo el recargue. El valor de 60 HRC se debe a que en este proceso, parte del recargue, se fusiona con el material base, incrementando su valor de dureza. Luego, en la ZAC, que en este caso tiene 13mm en la parte inferior aproximadamente, se puede divisar, una vez más, un decremento en la dureza. Por último, la zona alejada del recargue o zona granulada, mantuvo la dureza del material original, en la mayoría de su área.

3.2.3. Resultados del refuerzo por termorociado con polvos de carburo de tungsteno

Al igual que los resultados anteriores, el refuerzo por termo rociado con polvos de carburo de tungsteno se encuentra en la parte superior izquierda y la afectación térmica del material base se presenta en la Figura 17.

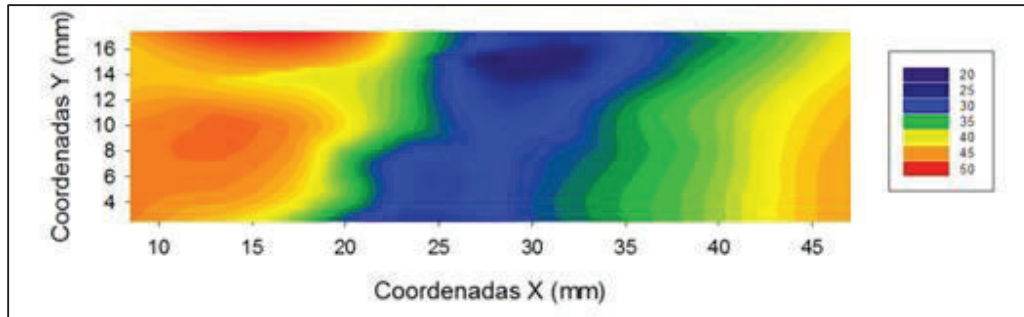


Figura 17.- Mapa de contorno de dureza en el material base luego de aplicar polvos de carburo de tungsteno por termorociado, dureza medida en HRC.

Como pudimos observar en los refuerzos anteriores, la zona templada presenta una dureza alta, mientras que en la ZAC, cuya medida aproximada es de 13mm, decrece esta propiedad, la cual se recupera en la zona granulada, repitiéndose así el mismo patrón de los otros dos refuerzos. Por otra parte, la dureza alcanzada en el aporte por soldadura de arco eléctrico no alcanzó la dureza que el fabricante indica en la hoja técnica, la cual es de 65 HRC comparada con los 47 HRC obtenidos. A diferencia del refuerzo con varilla de aporte y termorociado con carburo de tungsteno, que si alcanzaron su dureza luego de la aplicación.

3.2.4. Resultados del tratamiento térmico de temple y revenido a las puntas recargadas

Luego de constatar la pérdida de dureza en la ZAC, a consecuencia del depósito de los refuerzos, se decidió aplicar la receta del “tratamiento térmico 2”, con el fin de recuperar las propiedades del material base original. A continuación, se presentan las Figura 18, Figura 19 y Figura 20, donde se observan los cambios de dureza producidos luego de aplicar el tratamiento térmico. Es importante mencionar que las zonas perimétricas de los mapas de contorno no fueron medidas sino que son aproximaciones realizadas por el *software* utilizado.

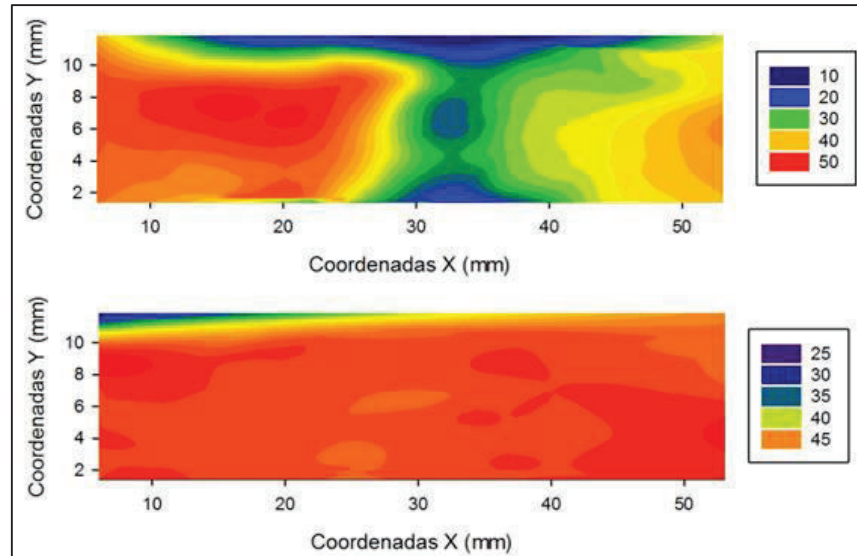


Figura 18.- Mapas de contorno de las muestras reforzadas con varilla de aporte de carburo de tungsteno, previo y posterior al tratamiento térmico.

Luego de aplicar tratamiento térmico al acero reforzado con varilla de aporte de carburo de tungsteno, se midieron valores de dureza similares sobre toda la superficie examinada, con un valor máximo de 45 HRC. Por otro lado, la micrografía de la superficie observada en varios puntos, corrobora la homogeneización del material planteada al observar los mapas de contorno.

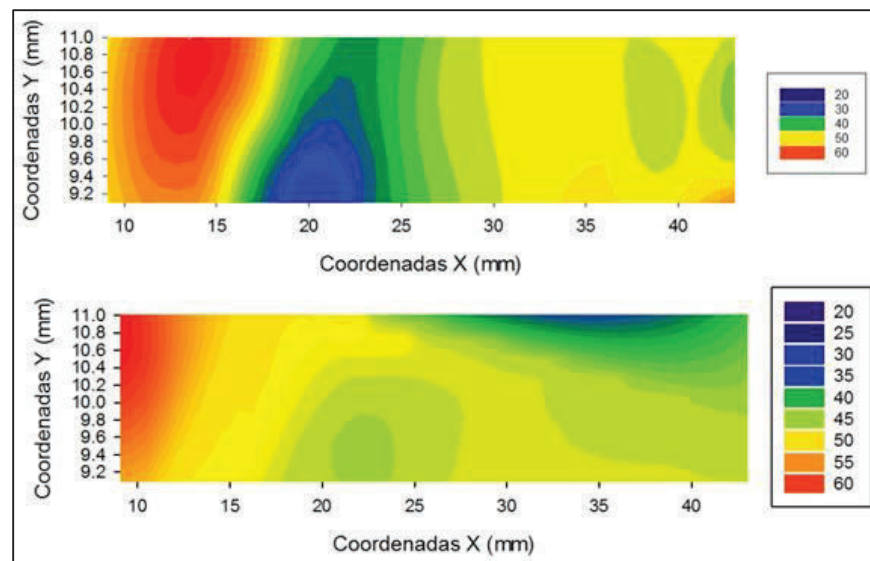


Figura 19.- Mapas de contorno de dureza en el material base de las muestras reforzadas por suelta de arco eléctrico, previo y posterior al tratamiento térmico.

De forma similar al caso anterior, se logró recuperar la dureza de la superficie a 45 HRC promedio. La zona más dura fue medida en el material fundido, entre el material base y el refuerzo, el cual no se afectó por la aplicación del tratamiento térmico y volvió a presentar un valor máximo de 60 HRC. Hay que aclarar que el área superior derecha marcada de azul del segundo mapa de contorno, muestra datos falsos calculados por el software, como relleno del resto del mapa. Asimismo, la estructura granular desapareció, siendo reemplazada por martensita y bainita acicular en toda el área examinada.

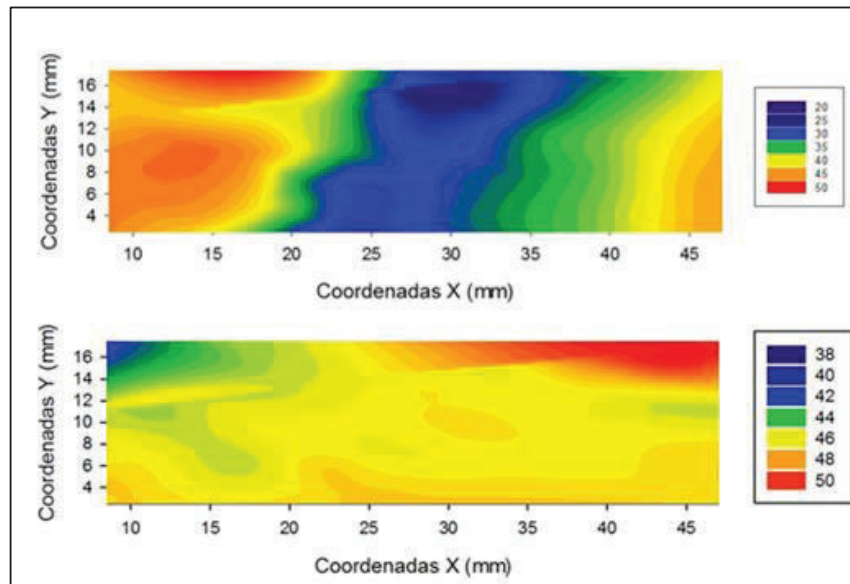


Figura 20.- Mapas de contorno de dureza del material base en muestras reforzadas por termorociado con polvos de carburo de tungsteno, previo y posterior al tratamiento térmico.

Luego de aplicar tratamiento térmico a la muestra, se observó un incremento de dureza en toda la superficie con un promedio de 47 HRC, menos en la zona bajo el refuerzo donde se midió un valor 45 HRC. Además, se puede mencionar que, la macrografía no reveló estructura granular, sino más bien fue necesario realizar una micrografía, donde se pudo confirmar la formación de martensita y bainita acicular, como en los casos anteriores.

Luego de observar los cambios de dureza, provocados por el tratamiento térmico aplicado a las muestras reforzadas, era importante analizar los refuerzos, para constatar si fueron afectados o no, por los tratamientos térmicos. Para ello, se muestran las medidas de dureza de los refuerzos antes y después del tratamiento térmico en la Tabla 7.

Tabla 7.- Cuadro de durezas de los recargues antes y después del tratamiento térmico.

REFUERZO	Promedio de durezas HV en los carburos y desviación estándar		Promedio de durezas HV en la matriz y desviación estándar	
	MUESTRAS REFORZADAS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO	REFORZADAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO	MUESTRAS REFORZADAS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO	REFORZADAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO
Varilla de aporte de carburo de tungsteno	1624 ± 153	1422 ± 60	161 ± 32	160 ± 29
Suelda de arco eléctrico	N/A	N/A	475 ± 380	632 ± 393
Termorociado con polvos de carburo de tungsteno	1359 ± 25	1644 ± 71	467 ± 557	879 ± 202

Los datos expuestos en la tabla anterior, revelan que, las medidas de dureza en los carburos y en la matriz de la varilla de aporte de carburo de tungsteno, antes y después del tratamiento térmico, no varían significativamente y que su desviación estándar está dentro de un rango moderado. Por otra parte, la matriz del refuerzo por suelda de arco eléctrico y por termorociado con polvos de carburo de tungsteno, tiene valores muy variables, de tal forma que para la matriz de termorociado sin tratamiento térmico, la desviación es mayor que el promedio.

3.3. Resultados de la producción y pruebas de campo de puntas recargadas

Luego de que las puntas trabajaran en el equipo por 77 horas, se las desmontó para realizar un análisis cualitativo de su desgaste (el análisis cuantitativo de pérdida de peso no es significativo en este tiempo de trabajo con el instrumental disponible), por esta razón se presentan a continuación en la Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24 las imágenes comparativas de cada una de ellas. Un dato importante a considerar es la posición que cada punta tuvo en el cucharón, ya que el desgaste dependerá de eso en gran parte. Adicionalmente en el ANEXO 12 se encuentran imágenes de la vista lateral de las puntas donde se visualiza una ligera diferencia entre la punta termorociada y el resto, la cual aparenta mayor desgaste.



Figura 21.- Comparación de la punta reforzada con varilla de aporte de carburo de tungsteno luego de 77 horas de trabajo.

En la punta de varilla de aporte de carburo de tungsteno, luego de 77 horas de trabajo, se observa un desgaste de las esquinas, desprendimiento de las partículas de carburo de tungsteno salientes en la cresta y ligero desgaste del cuerpo sin refuerzo. Por otro lado el refuerzo no se ha desprendido lo que indica una buena adherencia, considerando que el equipo en el cual está montada realiza labores de minería que pueden incluir mecanismos de desgaste abrasivo y de impacto.



Figura 22.- Comparación de la punta reforzada con suelda de arco eléctrico luego de 77 horas de trabajo.

En el caso de la punta reforzada con electrodo por soldadura eléctrica, la punta presenta un desgaste mayor en las esquinas que la punta reforzada con varilla de aporte de carburo de tungsteno, pero inferior al de la punta reforzada con termorociado. Sin embargo es la punta más desgastada en la zona sin recargue, lo cual se puede observar en la parte superior con las letras. No se observa desprendimiento del material de refuerzo pero si una superficie con un brillo mayor al refuerzo de las otras dos puntas, lo cual evidencia un desgaste abrasivo.



Figura 23.- Comparación de la punta reforzada por termorociado con polvos de carburo de tungsteno luego de 77 horas de trabajo.

La punta reforzada por termorociado con polvos de carburo de tungsteno presenta un desgaste desigual de la esquina del lado derecho y evidencia un desprendimiento del material de refuerzo en la cresta, ya que al observar la punta se puede identificar el material base. Por otro lado el material de refuerzo presenta un brillo bajo a comparación del aporte por suelda de arco eléctrico, evidencia de un menor desgaste abrasivo.



Figura 24.- Comparación de la punta original luego de 77 horas trabajadas en el equipo.

Finalmente, la punta original presenta un desgaste notable en las esquinas pero inferior al desgaste de la punta termorociada, y si se observa detenidamente se puede ver un desgaste uniforme de la cresta. Por otro lado el cuerpo sin recubrimiento se ha desgastado, casi hasta perder las letras de la parte superior. Estos resultados serán discutidos en el siguiente apartado, con los resultados de la caracterización ejecutada en muestras de menor tamaño.

3.4. Análisis económico de factibilidad de la manufactura y refuerzo de las puntas

Una vez culminada la ingeniería inversa, se conocen los materiales y procesos de manufactura de las puntas originales, esto permite realizar un análisis de costos de producción para determinar la viabilidad productiva de estos repuestos en el país. Es importante destacar, que los datos utilizados para este cálculo han sido tomados de diferentes fuentes, y cuyo procedimiento se explica a continuación. El ANEXO 13 contiene algunos datos tomados para realizar los cálculos que se presentan.

Para exponer con mayor facilidad este cálculo, se va a partir de la siguiente fórmula:

$$\textcircled{1} Pp = Cp + (Mp * Cp)$$

$$\textit{determinando que:} \textcircled{2} Mp = 0.30$$

De donde,

Pp: Precio de la punta (desconocido)

Cp: Costo de la punta (a definir)

Mp: Margen de utilidad de la punta (definida para un 30%)

Para obtener estos datos, fue necesario, en primera instancia, descomponer el Cp:

$$\textcircled{3} Cp = MPp + CPp$$

$$\textcircled{4} \textit{conociendo que:} MPp = \$1.97/\text{Kg}$$

De donde,

MPp: Costo de la Materia Prima de la punta (ALIBABA, Alibaba.com, 2016). Ver ANEXO 12

CPp: Costo de Producción de la punta

El único valor que podemos obtener en este momento, es el de la materia prima de la punta (acero aliado al silicio), cuyo valor es el resultado del promedio de los precios de varios proveedores chinos (ALIBABA, Alibaba.com, 2016). Por otro lado, el CPp se obtiene de la siguiente manera:

- Se ha tomado como referencia a la empresa ecuatoriana “Vanderbilt”, que procesa aceros al silicio para producir resortes. Esto, con el fin de determinar el costo de producción de dichos resortes, ya que son similares al compuesto del acero de las puntas y nos darán un valor de referencia. Por lo tanto, para futuros cálculos, se propone que:

$$\textcircled{5} \text{ Cpp} = \text{CPr}$$

De donde,

CPr: Costo de Producción del resorte

- En segundo lugar, se va a obtener el valor del CPr, para lograrlo, es esencial valerse de la siguiente fórmula:

$$\textcircled{6} \text{ Pr} = \text{Cr} + (\text{Mr} * \text{Cr})$$

De donde,

Pr: Precio del resorte (\$1.80/kg) (tomado de Vanderbilt, 2016)

Cr: Costo del resorte (por determinar)

Mr: Margen de utilidad del resorte (Se asume un 30%)

Entonces, para obtener Cr, descomponemos $\textcircled{6}$ y remplazamos los valores

$$\text{Cr} = \frac{\text{Pr}}{1 + \text{Mr}}$$

$$\text{Cr} = \frac{1.80}{1.30}$$

$$\textcircled{7} \text{ Cr} = \mathbf{1.38}$$

Ahora, que se conoce el valor del Cr, se plantea que:

$$\textcircled{8} \text{ Cr} = \text{MPr} + \text{CPr}$$

$$\textcircled{9} \text{ conociendo que: MPr} = \$1.00/\text{Kg}$$

De donde,

MPr: Materia Prima del resorte (ALIBABA, Alibaba.com, 2016) Ver ANEXO 12.

Y CPr es el costo de producción.

Ahora sí, para obtener el valor CPr, remplazamos $\textcircled{9}$ en $\textcircled{8}$

$$\text{Cr} = \text{MPr} + \text{CPr}$$

$$1.38 = 1.00 + \text{CPr}$$

$$\textcircled{10} CPr = 0.38$$

- El siguiente paso es remplazar $\textcircled{10}$ en $\textcircled{5}$

$$\textcircled{11} CPp = 0.38$$

- Reemplazamos $\textcircled{11}$ y $\textcircled{4}$ en $\textcircled{3}$

$$Cp = 1.97 + 0.38$$

$$\textcircled{12} Cp = 2.35$$

Finalmente, reemplazamos $\textcircled{12}$ y $\textcircled{2}$ en $\textcircled{1}$ y obtenemos que

$$Pp = Cp + (Mp * Cp)$$

$$Pp = 2.35 + (0.3 * 2.35)$$

$$Pp = \$3.06/Kg$$

Ahora, es importante calcular el precio que tendrían las puntas “C” con un margen del 30% y un precio de materia prima de \$2.38/Kg obtenido de (ALIBABA, Alibaba.com, 2016), esto con el fin de realizar una comparación más objetiva. Por lo tanto, tenemos que:

$$P = C + (M * C)$$

$$P = 2.38 + (0.3 * 2.38)$$

$$P = \$3.09/Kg$$

Considerando los cálculos realizados podríamos decir que, la producción y venta de puntas en Ecuador a \$3.09/kg, comparada con los \$3.06/kg de la punta china no resulta muy conveniente ya que al darse esta actividad se estaría ganando la misma cantidad realizando un esfuerzo mucho menor, con una inversión sumamente alta. Esta inversión incrementaría aún más el costo de las puntas para poder recuperar dichos valores en un determinado tiempo. Por otra parte, es necesario analizar la opción de reforzar puntas con los procesos de “recargue duro” estudiados como opción paralela a la manufactura y que si bien no genera un cambio de matriz productiva pleno, podría tener un buen resultado generando fuentes de empleo.

A continuación, se muestran los costos generados en cada uno de los procesos (Soldadura de arco eléctrico, Varilla de aporte de carburo de tungsteno y termorociado con polvos de carburo de tungsteno). Estos valores se presentan en la Tabla 8 y servirán posteriormente para el análisis de factibilidad de costos. Es importante mencionar que, para el costo de mano de obra se consideró un salario mensual de \$403.91 para el operador, esta cifra se basa en el promedio de los sueldos mínimos sectoriales en metalmecánica. Por otro lado,

para obtener el costo de mano de obra por punta reforzada, se estimó que el operador promedio puede producir 32 puntas diarias con cualquiera de los tres métodos que se han estudiado.

Tabla 8.- Datos de los costos en los tres procesos de refuerzo de las puntas. Fuente: Greenweld, 2016.

PROCESO	COSTOS					PRECIO CON 20% DE MARGEN CARGADO AL RECUBRIMIENTO
	MATERIALES PARA REFUERZO	MANO DE OBRA	TRATAMIENTO TÉRMICO	PUNTA ORIGINAL "C"	TOTAL PUNTA REFORZADA	
Soldadura de arco eléctrico	0.71	0.57	1.53	18	20.81	21.13
Varilla de aporte de carburo de tungsteno	32.43	0.57	1.53	18	52.53	60.78
Termorociado con polvos de carburo de tungsteno	30.36	0.57	1.53	18	50.46	58.19

Como se puede observar en la tabla, el costo total de la punta reforzada, dependerá del material que se use para dicho fin, por otro lado, debido a la afectación térmica que produce el reforzar las puntas, se ha considerado un costo por tratamiento térmico, así como se visualiza en la tabla anterior, y cuyo valor resulta del cálculo mostrado en el ANEXO 11. Además, se ha considerado en la tabla un precio de venta que, resulta de obtener un 20% de margen en la sumatoria de los materiales para el refuerzo y la mano de obra, y esto sumado al tratamiento térmico y a la punta original, de donde obtenemos los valores comparativos con otros productos que ofrece el mercado.

Analizando los precios obtenidos podemos decir que, la punta reforzada con suelda resulta muy competitiva con respecto a las demás puntas, inclusive que a la misma punta original sin recargue, y que para confirmar esto sería recomendable realizar pruebas prolongadas de las puntas reforzadas contra las originales. Adicionalmente, cabe mencionar que el mercado ofrece puntas con refuerzos de carburo similares a los ensayados, y que las puntas obtenidas en el presente trabajo serían muy competitivas con las que ofrece el mercado.

Finalmente se recomienda realizar pruebas de campo con puntas recargadas y tratadas térmicamente, para obtener valores comparativos reales de rendimiento. De no darse esta recomendación las puntas podrían tener un desgaste acelerado en la zona de la ZAC

arrojando un valor comparativo falso basado en los cálculos realizados, los cuales contemplan un tratamiento térmico.

4. Discusión

Luego de finalizado el trabajo, es necesario discutir sobre los temas investigados, con el fin comprender a fondo los resultados obtenidos y concluir con los objetivos planteados. Es por ello, que a continuación se desarrollan varios temas relacionados con los ensayos, resultados y casos particulares encontrados.

4.1. Caracterización de las puntas originales

Con la información obtenida de la caracterización de los materiales originales, se puede discutir acerca de la composición química, dureza y microestructura que los aceros A, B y C presentan, adicionalmente se hablará sobre el desarrollo de un tratamiento térmico que permita obtener la microestructura y durezas de fábrica. A continuación se muestra en la Tabla 9, la composición química de los aceros con sus principales aleantes y la desviación estándar calculada entre las muestras.

Tabla 9.- Composición química de los aceros con sus principales aleantes.

Aleantes	A	B	C
	(%)	(%)	(%)
Hierro (Fe)	94.47	95.27	95.6
Silicio (Si)	2.33	1.41	1.01
Manganeso (Mn)	1.45	1.03	1.1
Cromo (Cr)	0.62	1.39	1.43
Carbono (C)	0.38	0.28	0.33

Como se puede observar, la diferencia más marcada entre los aceros se encuentra en la cantidad de silicio presente en su composición, De forma general se sabe que los aceros tipo S, aleados principalmente con manganeso, silicio y cromo, tienen un límite elástico elevado, alta tenacidad pero baja resistencia al desgaste (ASM International, 2008). Esta información contrasta parcialmente con lo ideado para un material en herramientas de corte, ya que éstos deberían estar dotados de propiedades mecánicas elevadas y alta resistencia al desgaste abrasivo. Esta información confirma la importancia de ensayar y estudiar acerca de recubrimientos duros, los cuales se prueba en el presente trabajo.

Por otra parte se determinó para los tres casos una microestructura martensítica, bainítica con precipitados de carbón en los materiales A y C, que son evidencia de que los aceros fueron tratados térmicamente. Este tipo de microestructuras se obtienen de un rápido enfriamiento del acero en estado austenítico, donde pasa a formarse la martensita. Seguidamente se debió aplicar un revenido, el cual le resta dureza y fragilidad a la pieza, para que sea resistente a las cargas de impacto (aumento de tenacidad). La dureza superficial se mantiene en cierto grado para resistir al desgaste abrasivo. De forma paralela se puede mencionar que dependiendo de la microestructura, el material puede tener más o menos resistencia al desgaste. Para corroborar lo mencionado se puede observar la Figura 25, que muestra las diferentes microestructuras de aceros al carbón y su resistencia al desgaste abrasivo.

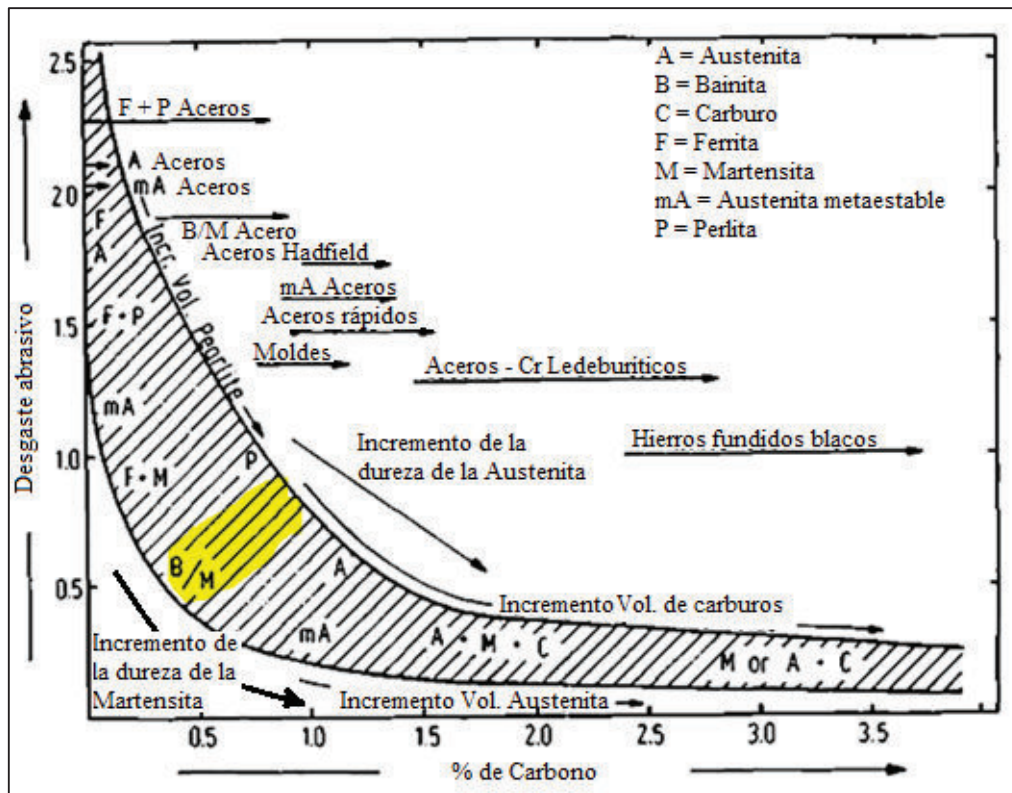


Figura 25.- Pérdida por desgaste abrasivo en escala arbitraria versus aleación de hierro en porcentajes de carbono, medido por el método de pin abrasivo. Tomado y traducido de: (GAHR, 1987)

Se puede ubicar a los aceros estudiados en la zona marcada de amarillo en la figura, por la microestructura de martensita-bainita encontrada en los ensayos micrográficos. Esto nos da

a entender que el material posee una pérdida por desgaste abrasivo relativamente baja, en relación de aceros con diferente microestructura, definiendo la importancia de aplicar un tratamiento térmico que permita obtener esta microestructura.

Al realizar los ensayos de tratamiento térmico a los aceros se pudo obtener microestructuras y durezas semejantes a las esperadas. Inicialmente se realizaron pruebas de tratamiento térmico solo con temple, donde a pesar que se consiguió una dureza elevada cercana a los 49 HRC, la microestructura obtenida no era la deseada. Esta microestructura obtenida si bien era martensita, carecía de los precipitados de carbón observados en el acero “C”, esto se debió a la falta de revenido como parte complementaria al temple que se había aplicado. Posteriormente se aplicó el “tratamiento térmico 1” descrito en capítulos anteriores, el cual aplicaba un temperatura máxima de temple de 860°C, temperatura mínima de 10°C y un revenido a 440°C, pero no se consiguió nuevamente los resultados esperados, por lo que se decidió para el “tratamiento térmico 2” elevar su temperatura de temple a 900°C y añadir hielos al agua para reducir su temperatura a 5°C, adicionalmente descender la temperatura de revenido a 380°C, lo cual se acercó a los resultados esperados, marcando de esta forma la pauta para alcanzar lo propuesto. Los cambios en la receta de tratamiento térmico están sustentados en (Ismail Ozdemir, Umit Cocen, Kazim Onel, 2000), donde indican que, al elevar la temperatura de temple y descender la mínima el resultado será un acero más duro.

4.2. Refuerzo de las puntas

Luego de realizar un análisis de los materiales de las puntas originales, es necesario discutir acerca de las puntas reforzadas y los efectos que la aplicación de estos refuerzos podrían provocar en ellas. Un tema interesante a discutir, es la formación de fracturas en el refuerzo por soldadura de arco eléctrico observadas en el microscopio, ya que estas son concentradoras de esfuerzos que pueden provocar la falla de las puntas. De antemano se conoce que las soldaduras son áreas propensas a generar fracturas, principalmente ocasionadas por las contracciones térmicas de enfriamiento del material fundido. (Héctor Hernández A, Édgar Espejo Mora, 2002) Para lo cual es de utilidad citar los coeficientes de expansión térmica del acero “C”, de un acero aleado con cromo, similar al del electrodo, de níquel y del WC, razón por la cual se genera la Tabla 10, donde se pueden observar los

datos usados para el análisis de las longitudes de estos dos materiales en distintas temperaturas, junto con sus coeficientes de expansión térmica lineal.

Tabla 10.- Coeficientes de expansión térmica lineal aproximada y longitudes del electrodo UM65 y del acero "C" a 900°C y 5°C (temperaturas máxima y mínima en el "tratamiento térmico 2"). Fuente: (MatWeb, 1996-2016)

COEFICIENTE DE EXPANSIÓN LINEAL ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)		
TEMPERATURA	A 900 °C	A 5 °C
Níquel	1.31E-05	No se dispone
WC	7.30E-06	5.20E-06
Electrodo	1.21E-05	1.04E-05
Acero "C"	1.61E-05	1.09E-05

Estos coeficientes mostrados en la Tabla 10, son prueba que el acero cambia su longitud en mayor proporción que el material del electrodo, siendo evidencia de que una de las causas posibles para generar fracturas en el refuerzo, es la diferencia de coeficientes de expansión térmica, los cuales provocan los cambios dimensionales de los materiales a razón de los cambios de temperatura. Por otra parte, cabe mencionar que, si bien el níquel tiene la diferencia de coeficientes más marcada, los refuerzos con varilla y termorociado no sufrieron fracturas, esto se debe a que este material tiene la facilidad de deformarse plásticamente, adaptándose de mejor forma a los cambios de longitud producidos en el enfriamiento.

Por otra parte, es necesario analizar la efectividad de los procesos de refuerzo aplicados a los aceros y esto se lo puede realizar comparando las medidas de dureza alcanzadas en las muestras, con la dureza propuesta por el fabricante del material. De esta forma, se toman los datos promedio de durezas medidas en los carburos y matrices de los refuerzos y los datos tomados de las hojas técnicas de los materiales de aporte, los cuales son comparados a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11.- Promedio de durezas de los refuerzos medidos y teóricos. HRC

DUREZAS (HRC)						
REFUERZO	Medidas en los carburos	Teóricas de los carburos	Diferencia en los carburos	Medida en las matrices	Teóricas de las matrices	Diferencia en las matrices
Varilla de aporte de carburo de tungsteno	63	77	-14	10	14	-4
Suelda de arco eléctrico	N/A	N/A	N/A	60	65	-5
Termorociado con polvos de carburo de tungsteno	69	70	-1	47	63	-16

Como se puede observar, todos los valores promedio medidos de dureza en los carburos o en las matrices, resultaron ser menores que los indicados por los fabricantes. Los valores de dureza perdidos más importantes son los alcanzados en el proceso de varilla de aporte, donde la diferencia es de 14 HRC, en la matriz de suelda de arco eléctrico donde faltan 5 HRC para alcanzar un valor ideal y en la matriz de los polvos de carburo de tungsteno con 46 HRC por debajo de lo establecido por el fabricante. Por lo tanto, se debe mejorar el proceso de aplicación de los refuerzos, para elevar la dureza final de los aportes, ya que estos se han seleccionado para proporcionar una capa dura a las puntas y se debería procurar alcanzar sus máximas prestaciones. Otra posibilidad, puede ser también, que el material de aporte no haya estado en condiciones óptimas y que eso degradó en un resultado desfavorable para el trabajo, pero queda esta hipótesis planteada para realizar un análisis que ponga a prueba a los materiales de aporte antes y después de su aplicación.

Otro punto importante en el tema de los refuerzos, es el analizar los cambios sufridos por los aceros, debido al calentamiento y enfriamiento experimentado por los materiales al depositarse las capas de recubrimiento. Los mapas de contorno generados confirman lo mencionado por (George E. Totten, 1997), donde indica la diferencia de dureza de las zonas internas del material, con respecto a la distancia de la superficie enfriada a temperatura ambiente del mismo, que para el caso de este estudio se puede relacionar con la zona puntual de calentamiento donde se deposita el recubrimiento. Para analizar un ejemplo de lo ocurrido en las tres muestras, se presenta a continuación la Figura 26, donde se pueden observar las tres zonas formadas por la afectación térmica generada por la deposición del refuerzo.

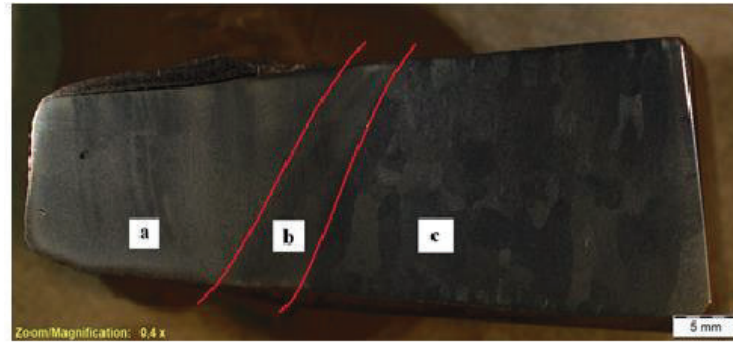


Figura 26.- Macrografía de la muestra reforzada por termorociado con polvos de carburo de tungsteno, dividida en tres zonas de afectación térmica.

La Figura 26 muestra tres zonas bien definidas de estructura, la zona (a) de dureza elevada promedio de 46 HRC, donde el material presenta en su micrografía martensita, esto debido a que esta sección alcanzó la temperatura más alta en el proceso de refuerzo y se templó al aire luego de finalizado. La zona (b), en cambio perdió su dureza de forma considerable, su micrografía mostró la formación de ferrita-perlita, igual que si hubiera sido sometida a un proceso de normalizado o austenitizado. Se cree que las zonas (a) y (c) impidieron que la zona (b) se enfríe de forma rápida lo que ocasionó que tenga el tiempo y energía necesarios para formar una microestructura ferrítica-perlítica, y de esta forma su dureza se reduzca de 49 HRC a un promedio de 4 HRC. Finalmente la zona (C) recupera su dureza y microestructura originales a medida que se alejan de la superficie reforzada. Esto genera la necesidad de aplicar un tratamiento térmico que permita recuperar las propiedades perdidas por los materiales base.

La falta de tratamiento térmico en la zona blanda ferrítica-perlítica (b), producirá el desgaste prematuro de dicha zona, debido a su dureza promedio cercana a los 3 HRC. La Figura 27, muestra la relación entre la resistencia al desgaste abrasivo con la dureza de la microestructura del acero, lo que ayuda a entender de mejor manera el comportamiento de los materiales ante un cambio de microestructura.

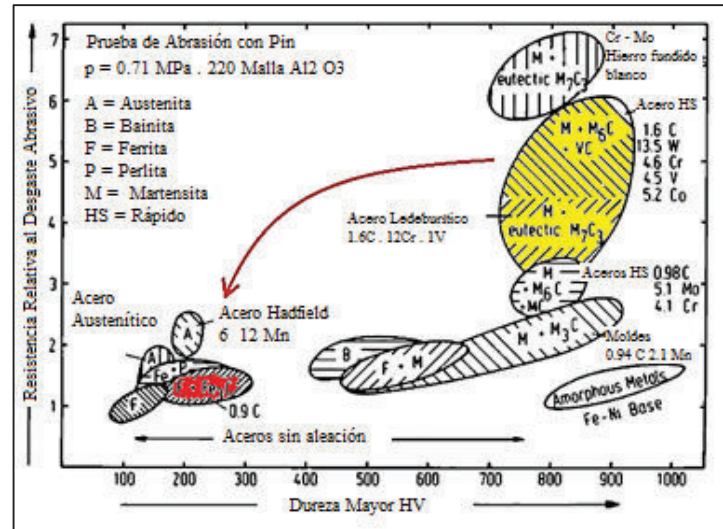


Figura 27.- Relación entre la dureza y resistencia al desgaste abrasivo de diferentes microestructuras y aceros aleados.

Tomado y modificado de: (GAHR, 1987)

En la Figura 27 se puede ver claramente que la ZAC, al pasar de martensita a ferrita-perlita va a perder significativamente su resistencia al desgaste abrasivo, dando lugar a una pérdida de material acelerada en esa zona. De esta forma se confirma la necesidad de aplicar tratamiento térmico a las muestras reforzadas. Por otra parte, el tratamiento térmico aplicado a las puntas genera un costo adicional al del refuerzo, lo que reduce el rango de competitividad por precio junto a una punta importada. Esto nos lleva a proponer la aplicación de temple inmediatamente después de la aplicación del recargue para aprovechar su temperatura elevada, y de esta forma realizar solamente revenido de las piezas reduciendo el costo por tratamiento térmico.

Un dato adicional relacionado con el refuerzo de las puntas, se refiere al desgaste desigual que éstas presentaron luego de las pruebas de campo, donde la punta reforzada con termorociado fue la más desgastada luego de 77 horas de trabajo, y que a pesar de encontrarse en el centro del cucharón se vio afectada notablemente, como se indica en las fotografías citadas en el capítulo 3.3. . Esta información se puede relacionar con la dureza medida luego del recargue, ya que el mapa de contorno de la punta termorociada muestra un valor de dureza inferior al de las otras punta reforzadas. El área de recubrimiento no es exactamente la misma para cada caso, pero todas presentan un desgaste muy ligero en comparación unas de otras. Por otro lado. Analizando los materiales de refuerzo se puede

observar que la superficie del aporte de suelda es más brillante que los otros dos materiales, por lo que se asume que este material se ha desgastado a mayor velocidad al no presentar rugosidades en su superficie desgastada.

4.3. Manufactura y recuperación.

Luego de examinar a fondo los temas relacionados con materiales y propiedades de los aceros y refuerzos, se puede discutir acerca de los resultados económicos que podría tener la aplicación de los refuerzos estudiados, relacionados con productos que el mercado ofrece y con los cuales se podría competir. Tomando el caso del recargue por suelda de arco eléctrico, se puede mencionar que se alcanzó un precio de venta moderado, considerando que la nueva punta cuenta con un recubrimiento con un poco más de 10 HRC, lo cual le va a proporcionar una duración adicional.

Por otra parte las puntas recargadas con carburo de tungsteno, ya sea en varilla de aporte o polvos, tuvieron un costo muy elevado sobre las puntas chinas (\$18.00) por lo que no van a ser competencia directa de este producto, pero si lo van a ser si se las compara con las puntas “A”, las cuales tienen un precio de venta promedio de \$70 sin recubrimiento en el mercado ecuatoriano, lo cual le da a la punta reforzada una ventaja como producto y a un precio más bajo. Es más, es posible ser competencia de otras puntas reforzadas con carburo de tungsteno, ya que la diferencia en precios para este caso incrementa más que para el caso anterior.

Un dato interesante entre los refuerzos de varilla de aporte y termorociado, es su diferencia de precios a pesar de que teóricamente tienen el mismo material de refuerzo, con la diferencia de tamaño de las partículas de WC contenido en la matriz de níquel, de donde se podría definir al proceso con varilla de aporte como el más eficiente, pero sería de utilidad realizar pruebas de campo con más tiempo de trabajo para corroborar esta teoría planteada. Adicionalmente se pudo observar que la punta reforzada con termorociado tuvo un desgaste más acelerado que la punta reforzada con varilla de aporte, lo que guarda relación con la ZAC encontrada para cada procedimiento, la cual fue mayor para el proceso de termorociado y que al trabajar las puntas sin tratamiento térmico, era posible que ésta se desgaste antes que la reforzada con varilla de aporte.

5. CONCLUSIONES

- Al comparar, tanto el precio de las puntas producidas (\$3.06/Kg) con el precio de las puntas importadas (\$3.09/Kg), se puede observar que su diferencia es mínima, por lo que, teóricamente, serían factible producirlas. No obstante, considerando que la diferencia es tan solo de \$0.03, y que producirlas implicaría una inversión mayor que importarlas, concluimos que no es factible manufacturar las puntas recargadas en el país.
- Las fracturas encontradas en la microscopia de las puntas reforzadas con suelda de arco eléctrico, demostraron que este método de recuperación es propenso a generar este tipo de concentradores de esfuerzos, los cuales pueden ocasionar falla repentina de la punta, generando de esta forma pérdidas de producción mientras se realiza su reemplazo.
- El material del cual están construidas las puntas es un acero hipoeutectoide aleado con Si, Mn y Cr, formado por fundición y forja y que en su procesamiento se aplica tratamiento térmico de temple + revenido. Presenta una dureza de 49 HRC promedio y su microestructura es martensita y bainita.
- Las puntas recargadas son una opción viable para introducir al mercado un producto competitivo con puntas de mayor calidad.
- La aplicación de refuerzos en las puntas genera ZAC con pérdidas de dureza importantes, lo cual hace indispensable la aplicación de tratamientos térmicos que permitan recuperar las propiedades de los materiales base y que como se ha probado no afectan al recubrimiento, a excepción del proceso de suelda por arco eléctrico donde las fracturas visualizadas previo al tratamiento incrementaron su tamaño.
- El tratamiento térmico aplicado a carburos de tungsteno descubiertos generó un material verdoso de composición desconocida depositado sobre los carburos y que

sería de utilidad el investigarlo para definir su procedencia y efecto sobre el material.

- Las puntas recargadas tuvieron un desempeño importante en las pruebas de campo realizadas, considerando que ningún refuerzo se desprendió y que de ser extendida su aplicación de prueba era muy probable que su vida útil se vea incrementada notablemente.
- Los refuerzos de carburo de tungsteno presentan mayor resistencia al desgaste que el refuerzo por suelda de arco eléctrico, lo que concuerda con la dureza que cada uno presenta.
- Los costos de los recargues son proporcionales a su dureza y a la cantidad de material utilizada, por lo que pueden ajustarse a un precio mayor o menor según la oferta que se desee realizar al mercado y que para cualquiera de los tres casos resulta un producto atractivo.

6. BIBLIOGRAFIA

- Garwin Mace Dr. Menomonee Falls. (17 de 06 de 2014). *MESSER MG Welding Products*. Recuperado el 23 de 08 de 2016, de <http://www.messerwelding.com/Product%20PDFs/by%20part/MG%20788.pdf>
- Garwin Mace Dr. Menomonee Falls. (17 de Junio de 2014). *Tungsten Carbide bearing composite rod*. Recuperado el 23 de Agosto de 2016, de <http://www.messerwelding.com/Product%20PDFs/by%20part/MG%20788.pdf>
- MatWeb, LLC. (1996-2016). *MatWeb*. Recuperado el 03 de 08 de 2016, de <http://matweb.com/>
- A., M. M. (1974). THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE, HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF FERRITIC MATERIALS. *Wear*, 59-68.
- A.H. Jones, P. Roffey. (2009). The improvement of hard facing coatings for ground engaging applications by the addition of tungsten carbide. *Wear*, 925-933.
- ACR. (17 de 01 de 2016). Crisis económica golpea a sector construcción. *EL MERCURIO*.
- ADUANA DEL ECUADOR. (2016). *Administración de nomenclatura y características de mercancía*. Recuperado el 21 de 07 de 2016, de http://ecuapass.aduana.gob.ec/ipt_server/ipt_flex/ipt_arancel.jsp
- ADUANA DEL ECUADOR. (2016). *REQUISITOS PARA IMPORTAR*. Recuperado el 21 de 07 de 2016, de http://www.aduana.gob.ec/pro/to_import.action
- ALIBABA. (2016). *Alibaba.com*. Recuperado el 20 de 06 de 2016, de http://www.alibaba.com/product-detail/silicon-steel-rod_60480593078.html?spm=a2700.7724838.0.0.84ziXp&s=p
- ALIBABA. (2016). *Alibaba.com*. Recuperado el 06 de 08 de 2016, de http://www.alibaba.com/product-detail/silicon-steel-rod_60480593078.html?spm=a2700.7724838.0.0.84ziXp&s=p
- Amardeep Singh Kang, Gurmeet Singh Cheema, Shivali Singla. (2014). Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades. *Procedia Engineering*, 1442-1451.

- ASM Internacional. (31 de Diciembre de 1995). *Heat Treater's Guide*. USA: Msterials Park, OH.
- ASM Internacional. (2002). *Metallographer's Guide, Practices and Procedures for irons and Steels*. ASM.
- ASM International. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. Ohio: Flake C. Campbell.
- B. G. Rabbat, M ASCE and H. C. Russell. (1985). Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout. *Journal of Structural Engineering*, 505-515.
- Callister. (s.f.). *MSE 300 Materials Laboratory Procedures, University of Tennessee, Dept. of Materials Science and Engineering*. Recuperado el 21 de 08 de 2016, de Iron-Carbon phase diagram: <http://web.eng.fiu.edu/wangc/EGN3365-9.pdf>
- CATERPILLAR. (2007). Catálogo AEHQ5866 (3-07). *Catálogo de excavadora 320D*. PTNR Caterpillar.
- Chrenko, R. Newman and R. M. (1959). Optical Properties of Nickel Oxide. *Physical Review*, 1511.
- Comité de comercio exterior. (22 de junio de 2012). Resolución No. 65. *Registro oficial 730*, págs. 415 - 427.
- Departamento de Metalurgia Extractiva, E. P. (2015). *Espectrometría de chispa RM-8299*. Quito.
- EL UNIVERSO. (04 de 01 de 2015). El petróleo cae y complica la economía de Ecuador este 2015. *EL UNIVERSO*.
- F. Geu Flores, A. Kecskemethy, A. Pottker. (2007). Workspace Analysis and Maximal Force Calculation of a Face-Shovel Excavator using Kinematical Transformers. *IftoMM World Congress, Besançon*, 1-6.
- GAHR, K. H. (1987). *Microstructure and Wear of Materials*. Amsterdam, Oxford, New York, Tokio: Elsvier.
- George E. Totten, M. A. (1997). *Steel Heat Treatment Handbook*. New York: Msrceel Dekker INC.
- George F. Schrader, Ahmad K. Elshennawy. (2000). *Manufacturing Processes and Materials, Fourth Edition*. Dearborn, Michigan.

- Georgios Koronis, Arlindo Silva, Mihail Fontul. (2013). A review of adequate materials for automotive applications. *Green composites*.
- Ghassemieh, Elaheh. (2011). Materials in Automotive Application. *University of Sheffield*.
- H&L Tooth Company. (s.f.). *H&L Tooth Company Counterpart*. Recuperado el 20 de 07 de 2016, de <https://www.youtube.com/watch?v=17oV9Tq19ME>
- Héctor Hernández A, Édgar Espejo Mora. (2002). *Mecánica de fractura y análisis de falla*. Bogotá: Sede.
- Hidnert, P. (1928). *Thermal expansion of heat resisting alloys: Nickel-Chromium, iron-chromium, and nickel-chromium-iron alloys*. Recuperado el 23 de Agosto de 2016, de http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/7/jresv7n6p1031_A2b.pdf
- Ismail Ozdemir, Umit Cocen, Kazim Onel. (2000). The effect of forging on the properties of particulate SiC reinforced aluminium alloy composites. *Composites Science and Technology*, 411-419.
- Juan Andrade Cetto, Antii J. Koivo. (2005). Controller for excavator during digging operations. *NATO Scientific Affairs Division*, 126-129.
- Ichiro TSUKATANI, Shun'ichi HASHIMOTO & Tsuyoshi INOUE. (1991). Effects of Silicon and Manganese Addition on Mechanical Properties of High-strength Hot-rolled Sheet Steel Containing Retained Austenite. *ISI Journal, Vol 31*, 992-1000.
- M.R. Mansor, S.M Sapuan, E.S. Zainudin, A.A. Nuraini, A. Huambali. (2011). Hybrid natural and glass fibers reinforced polymer composites material selection using Analytical Hierarchy Process for automotive break lever design,.
- MAcNAIR, F. C. Nix AND D. (1941). The Thermal Expansion of Pure Metals: Copper, Gold, Aluminum, Nickel, and Iron. *Physical Review*, 597-605.
- MatWeb. (03 de 09 de 1996-2016). *Matweb.com*. Recuperado el 03 de 09 de 2016, de <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a4aab488e0640e38cfbf2b954599d3c>
- MESSER MG Welding Products. (01 de 09 de 2014). *MESSER MG Welding Products*. Recuperado el 23 de 08 de 2016, de FUSEKOTE: 1010, 1020, 1030, 1040, 1060, 1070, 1075:

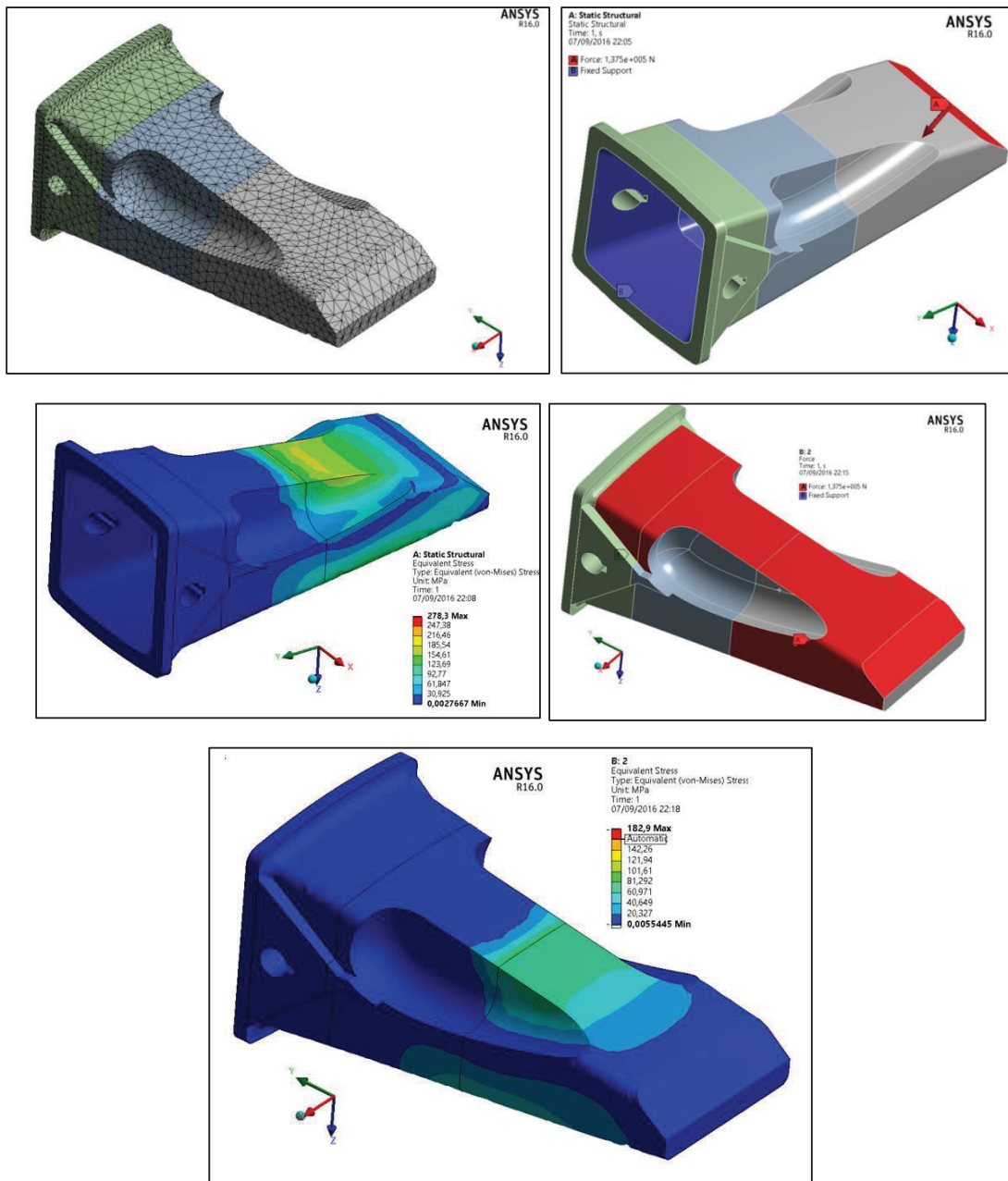
<http://www.messerwelding.com/MG%20MSDS%202014/FUSEKOTE%201010,%201020,%201030,%201040,%201060,%201070,%201075%20sds%209-14.pdf>

- Molera Solá, P. (1991). *Tratamientos térmicos de los metales*. Barcelona: MARCOMBO.
- P Baguet, J P Morizott and and G Desgardint. (1994). Evidence for the phenomenon of carburization-decarburization of tungsten carbide. 402-406.
- Patricio F. Mendez, Nairn Barnes, Kurtis Bell, Steven D. Borle, Satya S. Gajapathi, Stuart D. Guest, Hossein Izadi, Ata Kamyabi Go, Gentry Wood. (2013). Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, 1-22.
- RICHARDSON, R. C. (1967). The Wear of Metallic Materials by Soil-Practical Phenomena. *Journal agriculture engineering*, 22-39.
- S.N. Krishnan, V. Toppo, A. Basak, K.K. Ray. (2006). Wear behaviour of a steel weld-joint. *WEAR*, 1285-1294.
- Shivali Singla, Amardeep S. Kang, Jasmaninder S. Grewal, Gurmeet S. Cheema. (2014). Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth. *PROCEDIA Materials Science*, 256-266.
- SRI. (2016). *IMPUESTOS A CONSUMOS ESPECIALES (ICE)*. Recuperado el 21 de 07 de 2016, de <http://www.sri.gob.ec/de/web/guest/ice;jsessionid=bAiEY0yckK+463t-FKFzrcrf>
- Technologies, A. (2002). *Linear Thermal Expansion Coefficients of Metals and Alloys*. Recuperado el 23 de Agosto de 2016, de http://psec.uchicago.edu/thermal_coefficients/cte_metals_05517-90143.pdf
- Voort, George F. Vander. (2015). Understanding and measuring decarburization. *ADVANCED MATERIALS AND PROCESSES*, 22-27.
- World Freight Rates. (2013). *World Freight Rates*. Recuperado el 20 de 07 de 2016, de <http://www.worldfreightrates.com/es/>
- YASUHARU SAKUMA, OSAMU MATSUMURA, and HIROSHI TAKECHI . (1991). Mechanical Properties and Retained Austenite in Intercritically Heat-Treated Bainite-Transformed Steel and Their Variation with Si and Mn Additions. *METALLURGICAL TRANSACTIONS A* , 489-497.

- Yiyu Wang, Rangasayee Kannan, Leijun Li. (2016). Characterization of as-welded microstructure of heat-affected zone in modified 9Cr-1Mo-V-Nb steel weldment. *Materials Characterization*, 225-234.
- Yuen, R. Y. Chen and W. Y. D. (2002). Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. *Oxidation of Metals*, 433-468.

ANEXO 1

Este anexo muestra los análisis de esfuerzos realizados en ANSYS R16.0 considerando la fuerza máxima capaz de producir una excavadora de 138 hp igual a 137KN. El esfuerzo de Von Mises máximo se registra cuando la carga trabaja sobre la cresta de la punta y es igual a 278.3 MPa. (CATERPILLAR, 2007)



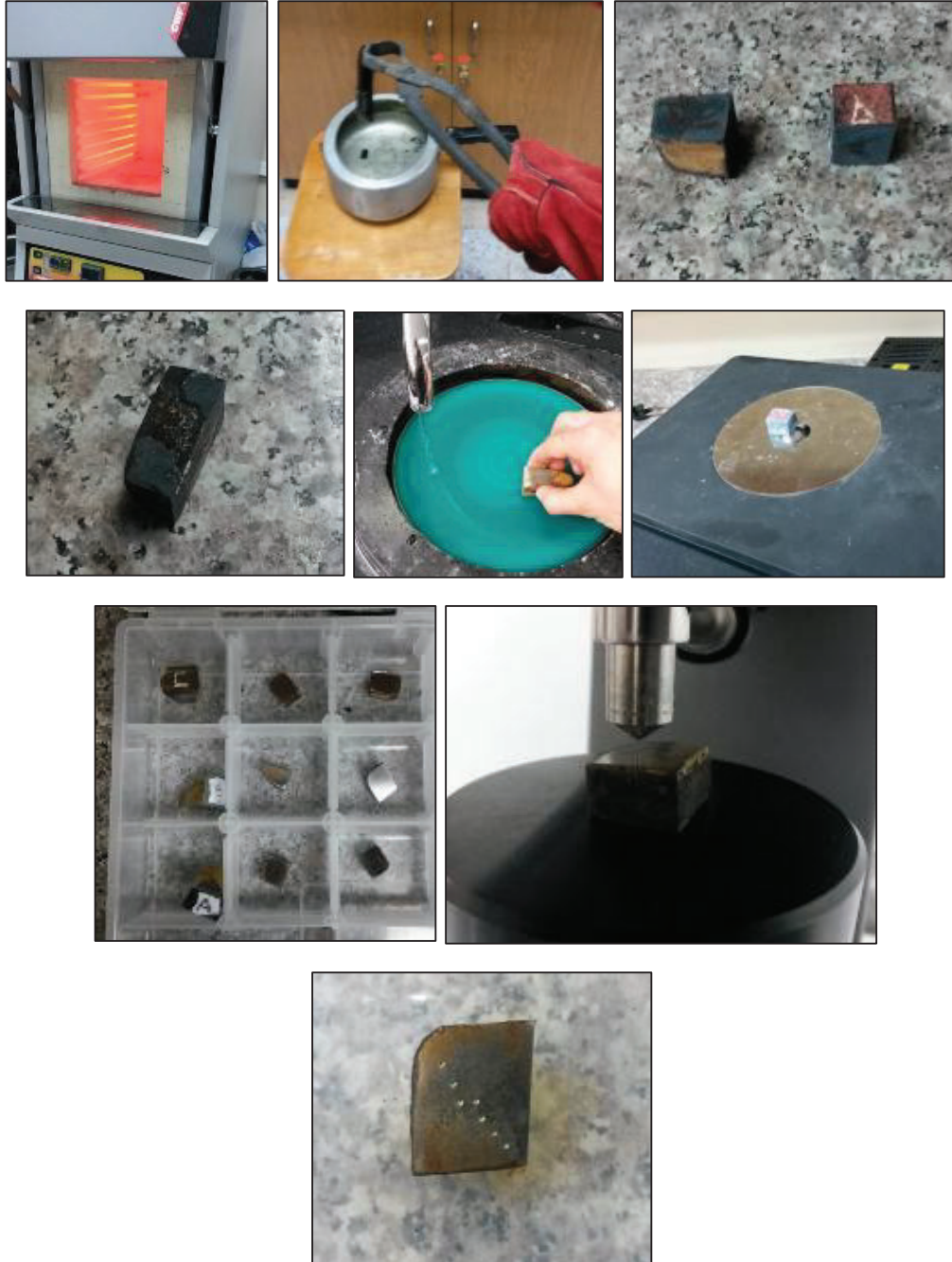
ANEXO 2

El presente anexo muestra imágenes del proceso de obtención de las muestras A, B y C; y parte de los ensayos de dureza y micrografía aplicados en la caracterización.



ANEXO 3

El anexo muestra imágenes de los ensayos de tratamiento térmico aplicados al acero austenitizado, la toma de durezas y las micrografías.



ANEXO 4

A continuación se presenta la evidencia de la aplicación de refuerzo en las puntas y en las muestras estudiadas. Las dos primeras imágenes muestran la preparación de las puntas, materiales, remoción de pintura, y calentamiento previo con equipo oxiacetilénico.



Las siguientes imágenes muestran parte del proceso con refuerzo de carburo de tungsteno



La siguiente figura es del equipo de soldadura, se emiten las del proceso porque por motivos de seguridad no se pudo fotografiar el mismo.



Finalmente se evidencia el proceso de refuerzo por termorociado con polvos de carburo de tungsteno y las tres muestras para realizar las pruebas de campo.



ANEXO 5

El anexo presenta la hoja técnica del electrodo utilizado en los refuerzos.

<h1 style="margin: 0;">KST EH CR 65</h1>						
CLASIFICACIÓN	DIN 8555			ELECTRODO REVESTIDO		
	E 6 UM 65 GRZ					
DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES	<p>Electrodo revestido de alto rendimiento (240%) que deposita una aleación de alta resistencia al desgaste debido a la presencia de carburos especiales de Mo, Nb, V y W. Utilizado principalmente en piezas para máquinas de movimiento de tierra, industria azucarera, cementeras, cerámica, e trituración de sinterizado en siderúrgicas. La resistencia a la abrasión está garantizada para temperaturas de trabajo hasta 600°C.</p>					
PROPIEDADES MECÁNICAS	Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Limite de fluencia 0,2% (N/mm ²)	Alargamiento (%)	Resistencia al impacto (J)	Dureza	
					63-65 HRC	
COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)	C	Cr	Mo	Nb	V	W
	5,0	22,0	8,0	8,0	1,0	2,0
AMPERAJE	DIÁMETRO (mm)			CORRIENTE		
	3,25 4,00			100 – 150 140 – 200		
PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN	<p>Utilizar corriente continua en polaridad positiva o corriente alterna. Aplicación en las posiciones plana y horizontal. Aplicar el electrodo perpendicularmente a la pieza con arco corto. En aceros de alto contenido de carbono depositar colchón con KST 4370 Fe, KST E 35 W o KST E 600 HT.</p>					
OBSERVACIONES						
<p>FABRICADO EN BRASIL POR:</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;">  <p style="font-size: small;">CONDICIONES DE SOLDAGEM SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE NBR ISO 9001:2000</p> </div> <div> <p>KESTRA UNIVERSAL SOLDAS IND., COM., IMP. E EXP. LTDA.</p> </div> </div>						

ANEXO 6

Hoja técnica de la varilla de aporte de carburo de tungsteno

MG 788

CARBUROS DE TUNGSTENO DE PARTICULAS LARGAS PARA TALADRAR Y DESBASTAR

Características Generales

La varilla tipo composite es fácil de usar para humectar, super dura de partículas de carburo de tungsteno que son sostenidos en una matriz que también tiene extra resistencia para mantener estas partículas de carburo sin que se desprendan, aún bajo condiciones extremas. Puede ser usado sobre acero, hierro fundido y aleaciones de cobre cuando los chips de carburos llegan a estar expuestos, ellos pueden ser calentados y reposicionados a una nueva exposición, los bordes de las formas reducen costos de aplicación. Disponible en varios tamaños los chips de carburo de tungsteno.

Aplicaciones

Pueden ser usados sobre taladradores, escareadores, dientes de draga, barrenadoras, estabilizadores, herramientas de molienda o cualquier parte que debe tenga abrasión severa. Usado extensivamente en la industria petrolera y de movimiento de tierras.

Datos Técnicos

Dureza.....Matriz Rb 94, carburo 77 Rc
Ajuste de la llamallama neutra
Tamaño de los carburos
De Tungsteno.....1/8" 3/16" ¼"

PROCEDIMIENTO

Limpiar la superficie a ser sobre aleada. Para mejores resultados, primero depositar una delgada capa de MG 130 sobre las áreas a ser aleadas. Precalentar el área a cerca de 315°C antes de estañar. Después de estañar, los carburos de tungstenos y la matriz serán depositados en el ancho y espesor colocando los carburos donde ellos sean mas efectivos. Asegurar mantener el estañado del área con el MG 130 para asegurar una buena calidad del depósito.

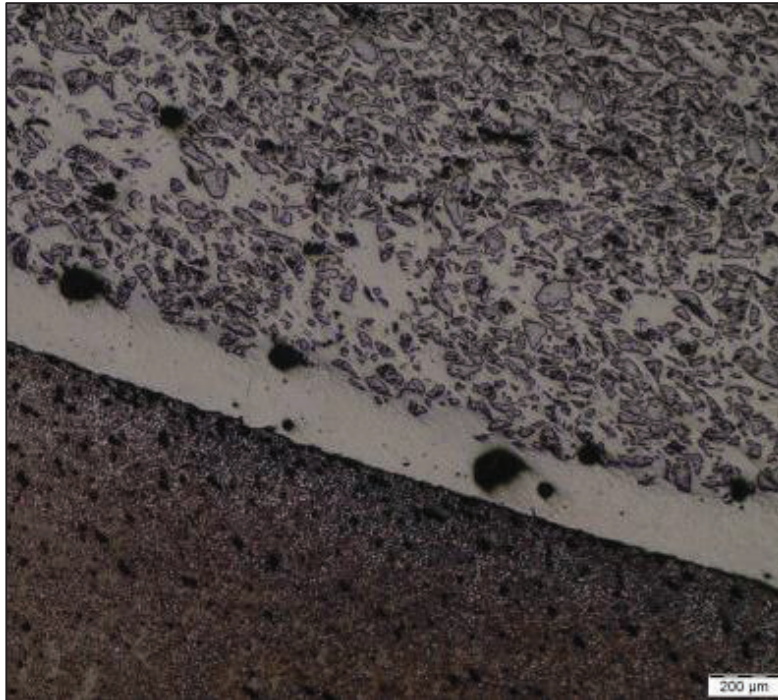
ANEXO 7

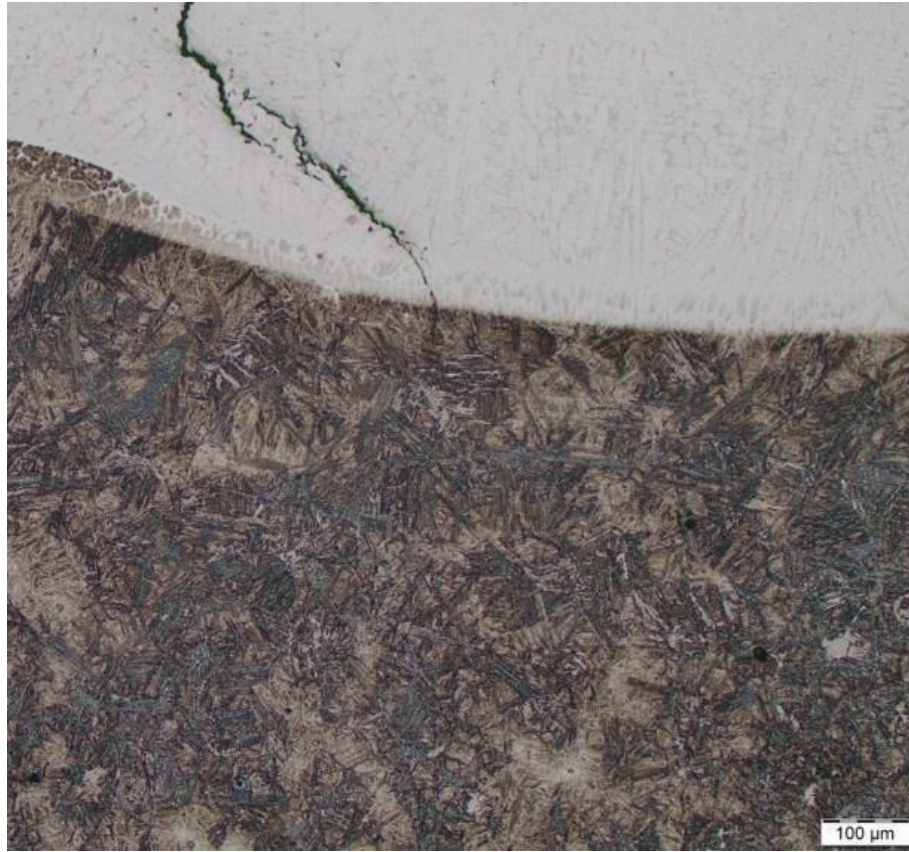
Imágenes de las muestras recargadas antes y después del tratamiento térmico, evidencia de el material verdoso formado sobre los carburos descubiertos, HAZ en las tres muestras y homogeneización de la estructura posterior al tratamiento.



ANEXO 8

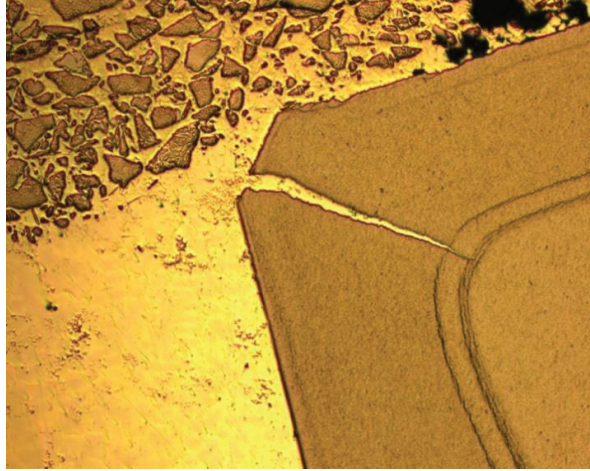
Microestructuras a 100X, de los tres recubrimientos en la zona de adherencia de los aportes. Se presentan en el siguiente orden, termorociado, varilla de aporte y suelda. En esta última se evidencia una fractura.



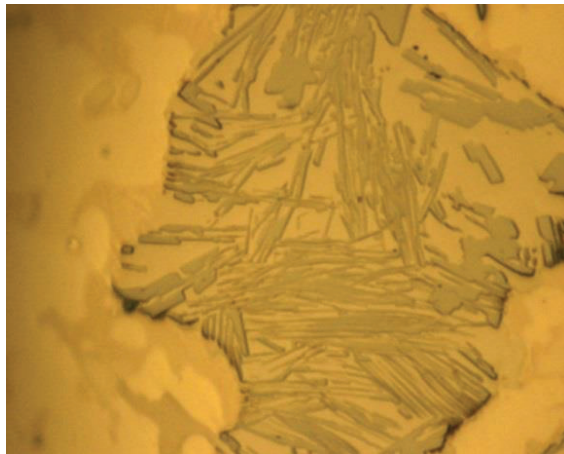
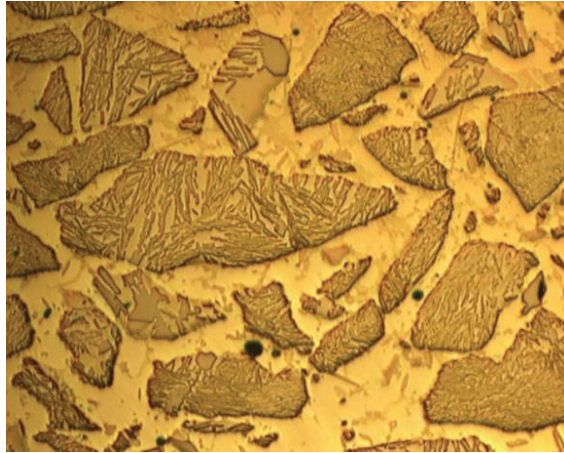


ANEXO 9

Micrografía de la zona entre carburo de tungsteno y polvo 1070 a 100X sin ataque, se observa una falla en los carburos de varilla.



Micrografías de partículas de Carburo de Tungsteno a 400X y 2000X sin ataque químico.



ANEXO 10

Imágenes del proceso de pruebas de campo, realizadas en una mina de material pétreo en San Antonio de Pichincha.



ANEXO 11

Este anexo muestra los datos y el cálculo del consumo energético que involucra el tratamiento térmico en una punta 5 Kg.

PARTE DEL PROCESO	Tiempo (horas)	POTENCIA (KW)	Precio de energía eléctrica (KW/h)	Consumo
CALENTAMIENTO TEMPLE	0.62	3	0.091	0.17
MANTIENE TEMPLE	5	1.5	0.091	0.68
MANTIENE REVENIDO	5	1.5	0.091	0.68
TOTAL				1.53

ANEXO 12

El anexo muestra las figuras de costado de las puntas luego de 77 horas de trabajo. Las dos primeras corresponden a la punta reforzada por suelda de arco eléctrico y a la original sin refuerzo, mientras que las dos siguientes son las reforzadas con varilla de aporte de carburo de tungsteno y termorociada con polvos de carburo de tungsteno.



ANEXO 13

La tabla contiene los precios utilizados en el cálculo de costos de producción de puntas nuevas en el país.

DATOS	ACERO DE RESORTE	ACERO AL SILICIO	PUNTAS “C” IMPORTADAS
PRECIO POR 10 TONELADAS	\$ 7,000.00	\$ 15,000.00	\$ 14,000.00
FLETE Y SEGUROS	\$ 1,387.00	\$ 1,441.70	\$ 2,070.89
AD VALOREM	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 4,017.72
FODINFA	\$ 419.35	\$ 822.09	\$ 803.54
ICE	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00
IVA	\$ 1,232.89	\$ 2,416.93	\$ 2,924.90
TOTAL TONELADA	\$ 10,039.24	\$ 19,680.71	\$ 23,817.06
PRECIO POR KILOGRAMO	\$ 1.00	\$ 1.97	\$ 2.38

Manufactura, Reconstrucción y Refuerzo de Herramientas de Corte para Maquinaria Pesada en Ecuador.

Morán N. Andrés E. / andresedu1987@outlook.com

Escuela Politécnica Nacional del Ecuador

Dirigido por: Alfredo Valarezo PhD / avalarezo@usfq.edu.ec

ABSTRACT

The interest to promote the local production in Ecuador, fostered by national government, has encouraged the development of new products. The analysis of the feasibility to produce certain imported goods is required to promote manufacturing in Ecuador. In this context, the present research analyses the viability of reinforcing and/or manufacturing heavy-duty machinery cutting tools. Analyses of hardness, microstructure, composition, and heat treatment were performed to three cutting tools (bucket teeth). The results showed that the cutting tool is made out of a tool steel (hypoeutectoid steel alloyed with Si, Mn and Cr) and its microstructure shows evidence of a heat treatment. Three different base materials were studied and one was chosen to be reinforced with hardfacing materials using electric arc welding, WC filler rod by OAW and WC flame spray powder. Finally, field tests of four cutting tools were performed (reinforced and an original one). It was noted that reinforcement process generated severe heat affected zones. Therefore, a heat treatment is mandatory to be applied to reinforced cutting tools. The hardfacing reinforcement was not significantly affected by the heat treatment

Keywords: abrasive wear protection, tungsten carbide (WC), welds coat, thermal spray, and excavator teeth, hardfacing.
