

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE VANADIO EN LA  
RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS  
DUROS CON 5% DE FERRO-TITANIO**

Tesis para optar por el Título de **Ingeniero Mecánico**, presenta el bachiller

**Luiggi Giancarlo Taipe Porras**

**Asesores: Dr. Francisco Aurelio Rumiche Zapata**

**Ing. José Luis Sakihama Uehara**

Lima, agosto del 2013

## Resumen

El desgaste abrasivo es un serio problema que afecta a diversas industrias a nivel mundial. En países que tienen una industria altamente desarrollada como Estados Unidos, Alemania, Japón o China, las pérdidas debido a este tipo de desgaste bordean los miles de millones de dólares anuales. Debido a las exorbitantes cifras de dinero que se pierden año tras año existe la necesidad de realizar investigaciones que minimicen los efectos del desgaste.

Debido a este gran problema para la industria, diferentes investigadores vienen desarrollando estudios para minimizar los efectos del desgaste. La Pontificia Universidad Católica del Perú en conjunto con la empresa Soldexa S.A. está desarrollando un proyecto de investigación que abarca el estudio de más de 15 nuevos electrodos para *hardfacing* con el objetivo de encontrar una formulación química óptima para el desarrollo masivo de un nuevo tipo de electrodo.

La presente tesis abarca el estudio de 3 recubrimientos duros con 5% de ferrotitanio y una composición de ferrovanadio que varía entre 0 y 1.85%. Se realizaron ensayos de dureza, de desgaste abrasivo según ASTM G-65, y de metalografía para cada uno de los tres recubrimientos en estudio.

Se obtuvieron resultados favorables pues con bajas concentraciones de ferrovanadio, la resistencia al desgaste y la dureza obtenida en los recargues es muy similar a la que obtuvieron otros investigadores con altas concentraciones de ferrovanadio. Asimismo, las microestructura para todos los casos fue la de una matriz de austenita retenida con colonias de martensita, lo que evidencia una correlación con las propiedades mecánicas evaluadas.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TÍTULO** : **INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE VANADIO EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DUROS CON 5% DE FERRO-TITANIO**

**ÁREA** : Materiales

**PROPUESTO POR** : Ing. José Sakihama Uehara

**ASESOR** : Dr. Francisco Rumiche  
Ing. José Sakihama Uehara

**TESISTA** : Luigi Giancarlo Taípe Porras

**CÓDIGO** : 2006.7178

**FECHA** : 07 de marzo del 2013

---

**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

El desgaste abrasivo es un serio problema que enfrentan muchos equipos de movimiento de tierras como los equipos de minería y construcción. Este tipo de desgaste hace que el tiempo de vida de los componentes mecánicos se reduzca notablemente, ocasionando grandes pérdidas a la industria debido al costo y tiempo empleados en mantenimiento, las paradas no previstas, entre otros factores.

Un Recargue Duro o *Hardfacing* es una técnica de modificación superficial de un componente mediante la aplicación de diferentes capas de soldadura con propiedades particulares. El material depositado forma un recubrimiento con buenas propiedades mecánicas, particularmente dureza y resistencia al desgaste, que definen el tiempo de vida del componente.

El presente trabajo de tesis busca encontrar una composición química óptima para la fabricación de electrodos para Hardfacing. Se han fabricado 3 tipos de electrodos con un contenido fijo de Ferro-Titanio y un contenido variable de Ferro-Vanadio (0%, 0.85% y 1.85%), para fabricar recubrimientos duros mediante soldadura sobre un sustrato de acero estructural. Se ha estudiado la influencia del contenido de Vanadio en la microestructura, dureza, y resistencia al desgaste de los recubrimientos. Para evaluar la resistencia al desgaste se empleará el Ensayo de Desgaste con Rueda de Caucho con Arena Seca según ASTM G65-04 (2010).

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO****INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE VANADIO EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DUROS CON 5% DE FERRO-TITANIO****PLAN DE TESIS****Esquema:**

## INTRODUCCIÓN

1. DESGASTE
2. RECARGUE DURO O “*HARDFACING*”
3. ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO – ASTM G65-04 (2010)
4. PROCESO EXPERIMENTAL
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## CONCLUSIONES

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

---

Dr. Francisco Rumiche Zapata

Asesor

---

Ing. José Sakihama Uehara

Asesor

A mi madre, por todo el sacrificio hecho por sus  
hijos y por su afán de darnos siempre lo mejor.



## AGRADECIMIENTOS

- ❖ A mi madre, por todas sus enseñanzas y formación en valores que me brindó. Por todos sus consejos, aliento y apoyo durante toda la carrera. Porque estuvo en los momentos buenos y malos de mi vida. Por todo el sacrificio que hizo para que yo pueda tener una educación de calidad. Porque no sería quien soy si no fuera por ella.
- ❖ A mi familia, por apoyarme y brindarme su siempre su cariño. Por ayudarme a crecer como persona.
- ❖ Al Dr. Ing. Paul Lean, por introducirme en el área de materiales y darme muchas oportunidades de crecimiento y desarrollo en esta área. Por la confianza que siempre tuvo en mí.
- ❖ Al Ing. José Sakihama por su apoyo incondicional para el desarrollo de esta tesis. Por escucharme y brindarme consejo cuando lo necesité. Por su amistad.
- ❖ Al Dr. Francisco Rumiche por haberme permitido iniciarme en el mundo de la investigación desde mis primeros ciclos de facultad. Por las enseñanzas que me brindó en temas de metalurgia y ensayos de laboratorio.
- ❖ Al profesor Sócrates Cútipa por estar siempre dispuesto ayudarme en temas académicos.
- ❖ Al personal del Laboratorio de Materiales de la Sección Ingeniería Mecánica.
- ❖ Al personal del Laboratorio de Manufactura de la Sección Ingeniería Mecánica.
- ❖ A la Pontificia Universidad Católica del Perú, por la formación integral que me brindó, por las oportunidades de estudios en el extranjero, por la calidad de su plana docente, y por los títulos deportivos que obtuve en su nombre.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
1.1.  DESGASTE.....	3
1.1.1.  Desgaste abrasivo.....	4
1.1.1.1.  Tipos de desgaste abrasivo .....	5
1.1.1.1.1.  Abrasión de bajo esfuerzo .....	5
1.1.1.1.2.  Abrasión de alto esfuerzo .....	6
1.1.1.1.3.  Abrasión penetrante.....	7
1.1.2.  Otros tipos de desgaste.....	9
1.2.  RECARGUE DURO O <i>HARDFACING</i> .....	10
1.2.1.  Selección del material de aporte .....	11
1.2.1.1.  Metal base .....	11
1.2.1.2.  Tipo de desgaste .....	11
1.2.1.3.  Selección del proceso de soldadura .....	11
1.2.2.  Microestructuras resistentes al desgaste.....	12
1.2.2.1.  Martensita .....	12
1.2.2.2.  Austenita ( $\gamma$ ).....	13
1.2.2.3.  Carburos .....	14
1.2.2.3.1.  Carburos en red .....	15
1.2.2.3.2.  Carburos dispersos .....	16
1.2.3.  Influencia de la composición química de los revestimientos de electrodos en la resistencia al desgaste.....	17
1.2.3.1.  Grafito .....	17
1.2.3.2.  Titanio y Vanadio .....	19
1.2.3.3.  Molibdeno .....	21
1.2.4.  Aplicación del recargue duro.....	23
1.2.4.1.  Limpieza .....	23
1.2.4.2.  Preparación de la superficie.....	24
1.2.4.3.  Espesor del depósito.....	24
1.2.4.4.  Precalentamiento y temperatura interfase.....	24
1.2.4.5.  Deformaciones .....	25
1.2.4.6.  Procedimientos de soldadura.....	25

CAPITULO 2 .....	26
2.1. PROCESO EXPERIMENTAL .....	26
2.1.1. Fabricación de probetas .....	26
2.1.1.1. Composición química .....	26
2.1.1.2. Dimensiones de las probetas .....	27
2.1.1.3. Procedimiento de soldadura .....	28
2.1.2. Ensayo de desgaste .....	29
2.1.2.1. Equipo de desgaste abrasivo según ASTM G65-04 (2010).....	31
2.1.2.1.1. Rueda de caucho .....	32
2.1.2.1.2. Boquilla para arena .....	33
2.1.2.1.3. Motorreductor .....	34
2.1.2.1.4. Temporizador .....	34
2.1.2.2. Material abrasivo .....	35
2.1.2.2.1. Medición de la humedad de la arena de fundición .....	36
2.1.2.2.2. Medición del porcentaje de impurezas de la arena de fundición .....	37
2.1.2.3. Procedimiento .....	39
2.1.3. Ensayo de dureza .....	44
2.1.4. Análisis metalográfico .....	45
CAPÍTULO 3 .....	47
3.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	47
3.1.1. Resultados .....	47
3.1.1.1. Análisis químico .....	47
3.1.1.2. Ensayo de dureza .....	47
3.1.1.3. Ensayo de desgaste .....	55
3.1.1.4. Metalografía .....	58
3.1.1.4.1. Probeta V-185 – 1.85% FeV .....	58
3.1.1.4.2. Probeta V-085 – 0.85% FeV .....	63
3.1.1.4.3. Probeta V-0 – 0% FeV .....	65
3.1.2. Discusión .....	67
3.2. CONCLUSIONES .....	68
Bibliografía .....	70

## INTRODUCCIÓN

La actividad económica que genera más divisas al Perú es la minería. De acuerdo al boletín mensual de minería del Ministerio de Energía y Minas del mes de mayo de 2012, en el año 2011, las exportaciones mineras representaron más de la mitad de las exportaciones nacionales, ascendiendo a un monto US\$ 27,361 millones.

Dos etapas importantes de la minería son la exploración y explotación. En estas etapas se emplean equipos mineros que se encargan principalmente de remover grandes cantidades de tierra, generando en ellos desgaste abrasivo con impacto. Este tipo de desgaste deteriora la superficie de los componentes mecánicos reduciendo su vida útil y ocasionando pérdidas de materiales, tiempo; y sobre todo afectando considerablemente la producción, que a su vez se refleja en grandes pérdidas económicas.

Con la finalidad de recuperar piezas desgastadas se aplica un depósito de una soldadura especial, llamado *Hardfacing* o recargue duro, sobre la superficie a recuperar o modificar para prolongar su tiempo de vida, ahorrando costos de adquisición de nuevas piezas. Los recargues duros o *Hardfacing* son un método para depositar material de aporte resistente a diferentes tipos de desgaste sobre la superficie de determinados componentes que estarán expuestos a abrasión e impacto, además permiten reducir costos de fabricación, empleando materiales base de propiedades mecánicas ordinarias, como un acero ASTM A-36. Es por esta razón que los recargues son tema de interés en la industria y en el ámbito de la investigación en la ingeniería de materiales. Ejemplos de componentes a los que se les aplica recargues duros son: cucharones, palas, tolvas de camiones y garras de equipos de minería.

Los factores más importantes que se deben controlar para determinar la resistencia al desgaste de los recubrimientos duros son la dureza y la microestructura. Esta última depende principalmente de la composición química del material de aporte empleado, del proceso de soldeo y de los parámetros de soldadura. Particularmente, los elementos químicos que más influyen en la formación de microestructuras duras, y por ende en la resistencia al desgaste de recubrimientos duros son carbono, vanadio, titanio y cromo.

En la presente tesis se evaluó el efecto del contenido de vanadio (V) en la resistencia al desgaste de recubrimientos duros depositados mediante soldadura en sustratos de acero estructural ASTM A-36. Para variar el contenido de vanadio se emplearon electrodos con tres porcentajes distintos de FeV (0%, 0.85% y 1.85%) y un contenido fijo de FeTi (5%) en el revestimiento de los mismos. Luego de la fabricación de los recubrimientos se realizó una caracterización metalúrgica de los mismos, y se evaluó su correspondiente dureza y resistencia al desgaste.

El método empleado para evaluar la resistencia al desgaste abrasivo, fue el “Método de ensayo estandarizado para evaluar la abrasión usando una rueda de caucho con arena seca”, según ASTM G 65-04 (2010). En este ensayo se empleó un medio de desgaste netamente abrasivo, simulando uno de los mecanismos de desgaste más comunes en los equipos de minería.

Cabe indicar que el presente trabajo forma parte de un conjunto de proyectos de investigación desarrollados conjuntamente con la empresa Soldexa S.A., enfocados en la fabricación y evaluación de un conjunto de nuevos electrodos para hardfacing.

# CAPÍTULO 1

## 1.1. DESGASTE

El desgaste se puede definir como el daño de una superficie sólida que generalmente involucra pérdida progresiva del material debido al movimiento relativo entre la superficie y una o varias sustancias de contacto [1].

En la industria se presentan generalmente 4 tipos de desgaste: desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, desgaste por corrosión y desgaste por impacto. La distribución de estos tipos de desgaste en las diferentes industrias es la mostrada en la Figura 1.

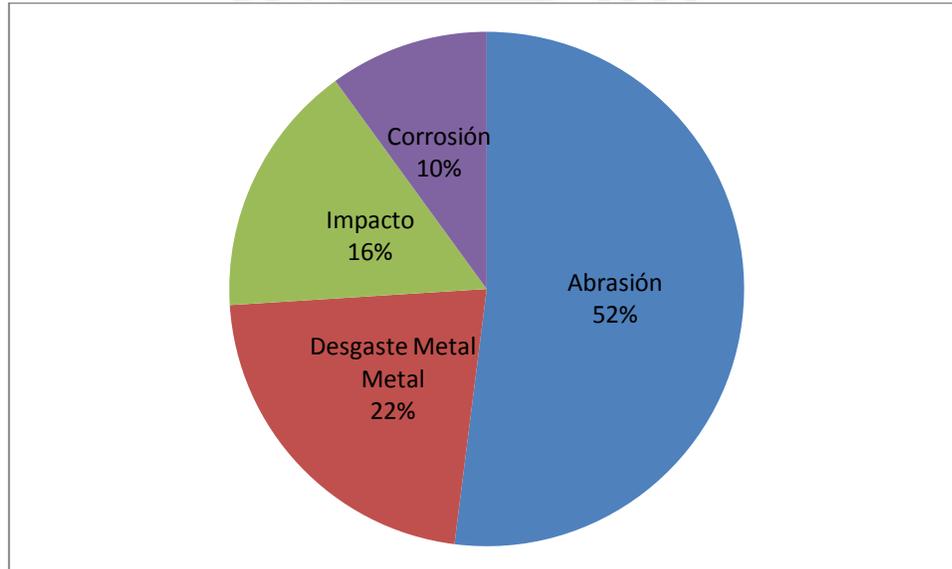


Figura 1. Distribución de desgaste en la industria [2].

Se puede estimar que las pérdidas económicas originadas por el desgaste en países industrializados son del orden del 0.3% al 3% del PBI nacional [3]. De acuerdo a los indicadores económicos que el Banco Mundial muestra en su sitio web [4] y a la distribución mostrada en la Figura 1 se puede estimar las pérdidas debidas al desgaste abrasivo de las principales potencias económicas del mundo. La Tabla 1 muestra las pérdidas económicas de algunos países.

Tabla 1. Pérdidas económicas debido al desgaste abrasivo [4].

País	Pérdidas (mil millones de \$)
Estados Unidos	151.66
China	61.14
Japón	57.18
Alemania	34.42

Debido a estas exorbitantes cifras, se hace necesario el estudio de métodos que permitan reducir el desgaste de los componentes mecánicos.

De acuerdo a Sydney [5], la separación de las partículas de una superficie metálica se produce por contacto con:

- Otro metal (desgaste adhesivo mecánico)
- Partículas abrasivas (abrazión)
- Líquidos o gases en movimiento (erosión)

A continuación se explicará los principales mecanismos de desgaste, poniéndose énfasis en el desgaste por abrasión por ser el mecanismo que se estudiará en esta tesis.

### 1.1.1. Desgaste abrasivo

Según la ASTM este tipo de desgaste es ocasionado por partículas duras o protuberancias duras que son presionadas y deslizadas a lo largo de una superficie sólida.

Los efectos de la abrasión son particularmente evidentes en las áreas industriales de agricultura, minería, procesamiento de minerales, movimiento de tierras, y especialmente en el transporte de partículas, rocas y minerales.

El porcentaje en que la superficie será desgastada por abrasión dependerá de las características de cada superficie, la presencia de partículas abrasivas entre las superficies, la velocidad de contacto y otras condiciones ambientales. Por esta razón el porcentaje de desgaste no es inherente al material [1].

### 1.1.1.1. Tipos de desgaste abrasivo

Las partículas abrasivas son presionadas contra la superficie desgastada con diferentes intensidades. Dependiendo de la intensidad con la que las partículas son presionadas se puede clasificar al desgaste abrasivo en tres tipos [1]:

1. Abrasión de Bajo Esfuerzo
2. Abrasión de Alto Esfuerzo
3. Abrasión Penetrante

Es importante resaltar que no existe un caso de abrasión en el que solamente haya un tipo de desgaste abrasivo, pues estos se presentan de manera combinada, sin embargo, siempre es posible determinar cuál es el predominante [1].

#### 1.1.1.1.1. Abrasión de bajo esfuerzo

Este tipo de desgaste abrasivo es el menos severo. Las partículas duras y afiladas que se desplazan por las superficies metálicas producen el desgaste de las piezas como consecuencia de la acción de desgarro repetido. Los principales factores que influyen en este tipo de abrasión son la velocidad, la dureza, el filo del grano abrasivo, el ángulo de ataque, el tamaño de las partículas abrasivas y el bajo impacto cuando el movimiento es paralelo a la superficie [6].

Los esfuerzos que se producen no son los suficientemente elevados para fracturar el grano abrasivo por lo que permanece relativamente intacto [1]. En la Figura 2 se puede apreciar este tipo de desgaste.

Los factores más importantes a tener en cuenta para medir la resistencia al desgaste de este tipo son la dureza y el contenido de carbono. Se ha observado que las matrices perlíticas con alto contenido de carbono proporcionan una mejor resistencia al desgaste que las matrices martensíticas de bajo contenido de carbono [6].

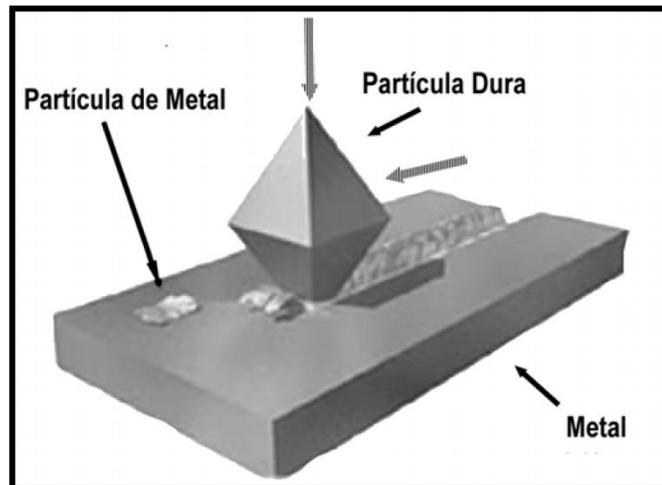


Figura 2. Abrasión de bajo esfuerzo [7].

Algunos equipos que presentan este tipo de abrasión son implementos agrícolas, tornillos sinfín, clasificadores, toberas de bomba de pulpa, equipos de proyección de arena, canaletas y ductos de transporte de material abrasivo como lodos, pulpas y cemento [6].

#### 1.1.1.1.2. Abrasión de alto esfuerzo

Este tipo de abrasión ocurre cuando las partículas abrasivas duras son presionadas contra una superficie metálica con un esfuerzo tal que es capaz de fracturar y triturar los granos abrasivos [1]. En la Figura 3 se puede apreciar este tipo de desgaste.

Las cargas normales sobre las superficies por lo general son bajas. No obstante, el área de apoyo de los granos es sumamente inferior al área de aplicación de la carga. Por esta razón, los esfuerzos que se generan son tan elevados que pueden ser del orden de los 2000 MPa [8].

Los esfuerzos generados son capaces de fracturar algunos microconstituyentes frágiles como los carburos que pueden existir en algunas superficies resistentes al desgaste. Al romperse las partículas abrasivas se generan ángulos filosos que son capaces de rayar a materiales extremadamente duros. El desgaste ocurrirá por rayado, flujo plástico local y agrietamiento microscópico [8].

Los materiales que pueden resistir mejor este tipo de desgaste son los recubrimientos que tienen aleaciones que presentan carburos de tungsteno en una matriz tenaz como lo pueden ser las matrices austeníticas al manganeso.

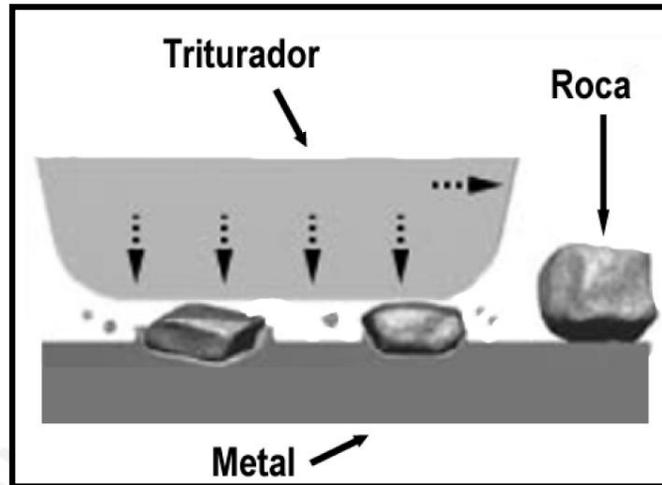


Figura 3. Abrasión de alto esfuerzo [7]

Basándose en diferentes pruebas y en su experiencia, Norman [9], enumera las matrices por orden creciente de resistencia al desgaste.

1. Ferrita de bajo carbono
2. Perlita y ferrita
3. Perlita globulizada
4. Bainita
5. Matriz Perlítica de alto carbono
6. Matriz Martensítica de alto carbono

Algunos ejemplos de elementos que están sometidos a este tipo de desgaste son barrenos, palas excavadoras, molinos pulverizadores, molinos de bolas y rodillos trituradores [6].

#### 1.1.1.1.3. Abrasión penetrante

La abrasión de bajo y alto esfuerzo algunas veces van acompañadas de cierto tipo de impacto y carga, cuando ocurre esto, el tipo de desgaste se denomina abrasión penetrante. En la Figura 4 se puede apreciar este tipo de desgaste. El nombre se debe a

la acción de las partículas abrasivas que penetran o se incrustan en la superficie semejante a un proceso de corte con una herramienta de corte, causando un efecto de desgaste extremo [8].

La característica principal de este tipo de desgaste son los altos esfuerzos que se generan producto del impacto que dan como resultado una microdeformación considerable de la superficie metálica [8].

Es común relacionar la dureza del material con su resistencia al desgaste abrasivo; sin embargo esto no puede ser aplicado al desgaste abrasivo penetrante, ya que se generan altos esfuerzos debido al impacto. Un acero o hierro fundido con elevada dureza y fragilidad, es sumamente vulnerable a los altos esfuerzos debidos al impacto, por lo que los aceros tenaces son la mejor opción para esta abrasión. Por ello, se suele utilizar materiales duros en forma de inserciones sobre matrices tenaces de acero [6].

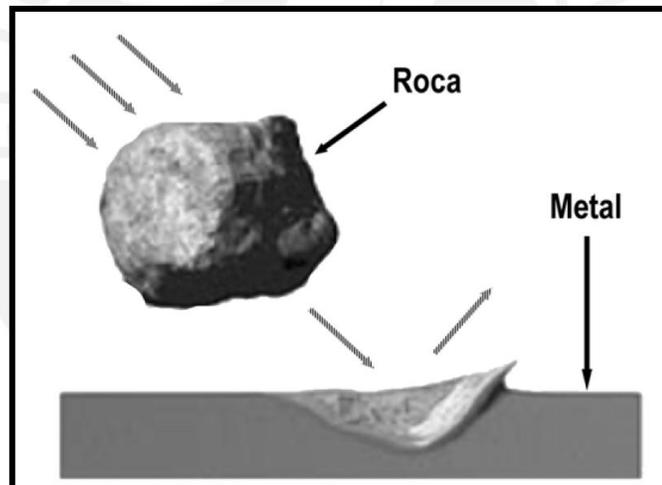


Figura 4. Abrasión penetrante [7].

Los aceros austeníticos son los materiales más empleados para contrarrestar el efecto de este tipo de desgaste. Las propiedades que presentan son: elevada tenacidad, capacidad de endurecimiento por impacto y la facilidad para liberar altos esfuerzos remanentes en grandes piezas fundidas. No obstante, un problema que presentan es que se vuelven demasiado duros en el proceso de endurecimiento dificultando su maquinabilidad, por lo que solo se aplica en componentes fundidos.

Algunos ejemplos de elementos que están sometidos a este tipo de desgaste son palas mecánicas, chancadoras de pera y chancadoras de quijada [6].

### 1.1.2. Otros tipos de desgaste

También existen otras formas de desgaste como las siguientes [6]:

- Desgaste por corrosión
- Desgaste debido al impacto
- Desgaste por contacto rodante
- Desgaste por microoscilación o fretting
- Desgaste adhesivo
- Desgaste por deslizamiento
- Desgaste por pulido
- Erosión por desgaste líquido
- Erosión por cavitación
- Erosión por partícula sólida

Por lo general, estos mecanismos de desgaste tampoco ocurren de manera individual, sino que en la realidad se presentan como una combinación de varios, siendo uno de ellos el predominante.

## 1.2. RECARGUE DURO O *HARDFACING*

“La aplicación de recubrimientos duros en superficies consiste en depositar alguna clase de aleación especial sobre una parte metálica, por alguno de los diversos métodos de aplicación de soldadura, para formar una superficie que resista la abrasión, el calor, el impacto y la corrosión, o alguna combinación de estos” [10]. La Figura 1Figura 5 muestra a un soldador aplicando un recubrimiento protector al cucharón de una excavadora hidráulica.



Figura 5. Aplicación de un recargue duro en el cucharón de un equipo minero [11].

El Hardfacing se puede utilizar tanto en procesos de fabricación, como en procesos de reparación.

En el primer caso se emplea un material base de mediana resistencia y se deposita el recubrimiento en la superficie de la pieza de trabajo principalmente en las zonas que estarán sometidas a mayor desgaste. Esto permite ahorrar dinero en la fabricación de componentes mecánicos pues evita la necesidad de fabricar toda la pieza con un material de propiedades mecánicas superiores.

En el segundo caso se repara la superficie desgastada para aplicar recargues con el fin de recuperar las tolerancias dimensionales iniciales, así como también mejorar las propiedades mecánicas del componente y prolongar su tiempo de servicio.

### 1.2.1. Selección del material de aporte

La selección del material o electrodos de aporte depende básicamente de tres factores, que son:

- Metal base
- Tipo de desgaste
- Elección del proceso de soldeo

#### 1.2.1.1. Metal base

Afecta principalmente la selección del material de aporte para la reconstrucción pues ambos deben ser compatibles. Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La composición y condición de la pieza a recubrir. Por ejemplo, los aceros al manganeso sujetos a altas cargas de impacto pueden ser reconstruidos usando depósitos de electrodos que contienen manganeso. Por otro lado, los aceros al carbono y de baja aleación se reconstruyen usando electrodos de acero de baja aleación [11].
- Espesor del material base y de las capas a depositar.
- Deformaciones, tensiones residuales y posibilidad de agrietamiento ocasionados por los altos gradientes de temperatura [6].

#### 1.2.1.2. Tipo de desgaste

La consideración más importante para la selección de las últimas capas del recargue duro es el tipo de desgaste que se tendrá una vez que el componente entre en servicio. Los principales tipos de desgaste se describieron en la sección 1.1.1.

#### 1.2.1.3. Selección del proceso de soldadura

La elección del proceso de soldadura es tan importante como la elección del material de aporte. Para escoger un adecuado proceso de soldadura se debe tener en cuenta los requerimientos de servicio, características físicas de los componentes, propiedades mecánicas del material base, la forma y composición química de los materiales de aporte,

requerimientos de calidad y propiedades mecánicas del recargue, habilidad del soldador y el costo de operación del proceso [10].

Por ejemplo, las partes que son muy grandes y difíciles de transportar requieren de un proceso de soldadura que se realice en campo, por lo que debe ser un proceso que emplee un equipo de fácil transporte. Por lo general en estos casos se realiza el recargue con procesos manuales, especialmente en zonas de difícil acceso cuando la pieza tiene geometría complicada. Por otro lado, las piezas que son de fácil transporte generalmente se trabajan en un taller con procesos semiautomáticos para mejorar la eficiencia [10].

El material base determinará si el proceso necesitará un pre y post calentamiento. Estos tratamientos tratan de reducir la deformación, la fisuración, y el choque térmico que puede formar microestructuras muy resistentes pero frágiles a la vez.

### 1.2.2. Microestructuras resistentes al desgaste

Se puede relacionar cualitativamente la microestructura con la resistencia al desgaste y otras propiedades mecánicas de los materiales. Las principales microestructuras que son resistentes al desgaste se presentan a continuación.

#### 1.2.2.1. Martensita

La martensita es el segundo constituyente más duro del acero después de los carburos. La dureza de ella depende de su contenido de carbono y no es afectada por otros elementos aleantes. La forma de su microestructura es acicular, es decir en forma de agujas entrecruzadas como se puede apreciar en la Figura 6.

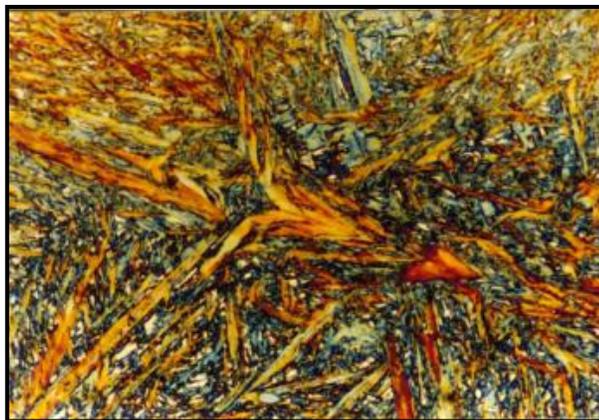


Figura 6. Martensita de un acero de alto carbono [12].

Las principales propiedades mecánicas de la martensita se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la martensita [12].

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia mecánica	1700 - 2500 MPa
Dureza	50 – 68 HRC
Elongación	0.5 – 2.5 %

Como se puede apreciar la martensita presenta elevada resistencia mecánica, elevada dureza, y por lo tanto elevada fragilidad. Asimismo, presenta una baja elongación.

#### 1.2.2.2. Austenita ( $\gamma$ )

Es la fase del acero de mayor densidad, y además posee una baja conductividad eléctrica con respecto a otras fases del acero; la característica principal de sus granos es su forma poligonal. Uno de los aspectos característicos de la austenita es que no es magnética [13].

Las propiedades mecánicas de la austenita varían con el porcentaje de carbono que posee el acero. En la Tabla 3 se puede apreciar los rangos de variación de la resistencia mecánica, dureza y elongación de la austenita. En general posee elevada resistencia, elevada dureza y elevada elongación; por lo tanto es una fase muy tenaz del acero. En la Figura 7 se puede apreciar una imagen de la austenita.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la austenita [12].

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia mecánica	880 - 1050 MPa
Dureza	30 HRC
Elongación	30 - 60 %

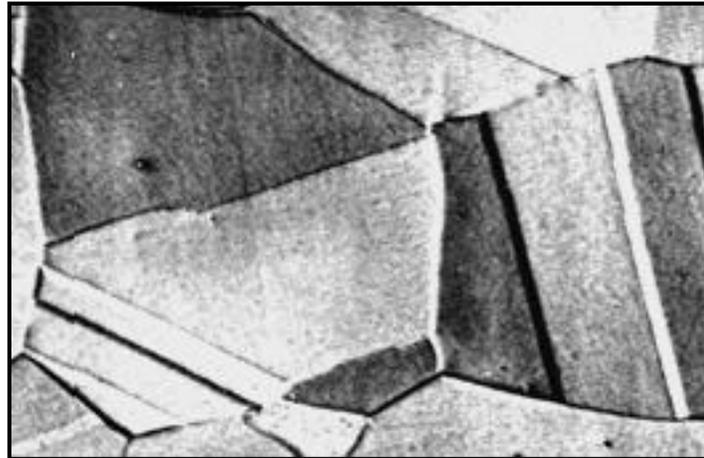


Figura 7. Austenita [14].

### 1.2.2.3. Carburos

La principal característica de los carburos es su elevada dureza que los hace resistentes al desgaste, como es el caso de aceros aleados al cromo o fundiciones blancas. La resistencia al desgaste que los carburos ofrecen depende de la relación de dureza que existe entre los carburos y la matriz. Si el carburo y la matriz presentan durezas similares, la resistencia al desgaste disminuirá pues el carburo actuará como un concentrador de tensiones [6].

En la Tabla 4 se muestran las propiedades de algunos de los carburos más importantes.

Tabla 4. Carburos más comunes en los depósitos de recargos duros [6].

Carburo	Microdureza HV (50g)	Densidad (g/c m <sup>3</sup> )	Características
Carburo de Titanio TiC	3300-4000	4.92	La mejor resistencia al desgaste a temperatura ambiente, escasa tendencia a la unión por soldadura en frío con la mayor parte de los materiales de construcción
Carburo de Vanadio VC	2300-2700	5.77	Presentan buena resistencia al desgaste y son muy estables a altas temperaturas.

Carburo de Cromo / Mezcla de (Cr, Fe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> y (Cr, Fe) <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	1900-2000	6.7	Es extremadamente resistente a la corrosión y puede resistir a la oxidación atmosférica a muy altas temperaturas (aprox 900 °C).
--	-----------	-----	--

Los carburos metálicos se encuentran en los aceros de dos maneras: carburos en red y carburos dispersos.

#### 1.2.2.3.1. Carburos en red

Los carburos en red se forman por precipitación a partir de un metal fundido de alto contenido de carbono, dando origen a una red continua en el metal solidificado. Estos carburos forman una estructura con elevada dureza pero a la vez con alta fragilidad por lo que presentan una baja resistencia al impacto. Por lo general este tipo de carburos presentan una matriz austenítica que es rodeada por los depósitos de carburos [15].

Los carburos en red incrementan la resistencia al desgaste y son efectivos contra la abrasión por esmerilado severo, siempre y cuando el carburo en red tenga una dureza mayor que la del abrasivo. El aumento de la resistencia al desgaste de un material es proporcional a la cantidad de carburo presente [15]. Un ejemplo de un carburo en red es la cementita que es una fase que está presente en los aceros hipereutectoides. En la Tabla 5 se puede apreciar los valores de las propiedades mecánicas más importantes de la Cementita y en la Figura 8 se puede apreciar una imagen de la misma.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de la cementita [12].

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia mecánica	35 MPa
Dureza	800 HB
Elongación	0%

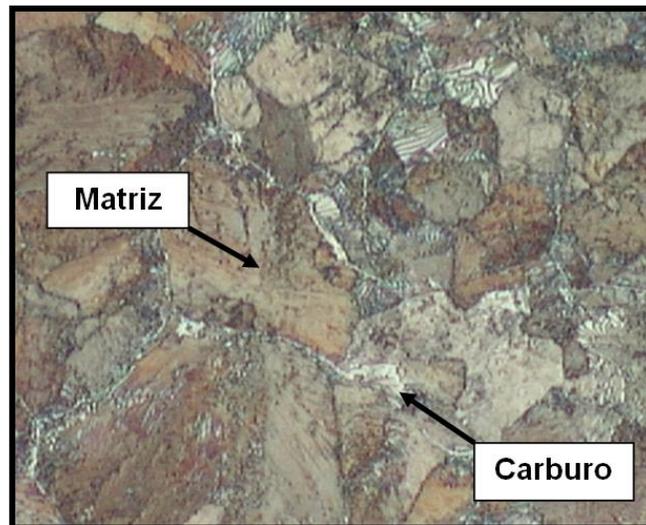


Figura 8. Microestructura de la cementita - Carburo de Hierro [16].

#### 1.2.2.3.2. Carburos dispersos

Los carburos dispersos están rodeados por metal que funciona como una matriz. Un porcentaje relativamente alto puede estar contenido en un depósito de soldadura. Mientras más disperso esté el carburo, las propiedades medidas en el depósito de soldadura reflejarán las propiedades de la matriz. Al emplear adecuadamente los depósitos con carburos dispersos se obtiene mejores resultados contra todos los tipos de desgaste, inclusive los combinados [15]. Se puede apreciar en la Figura 9 una microestructura formada por carburos dispersos de molibdeno.

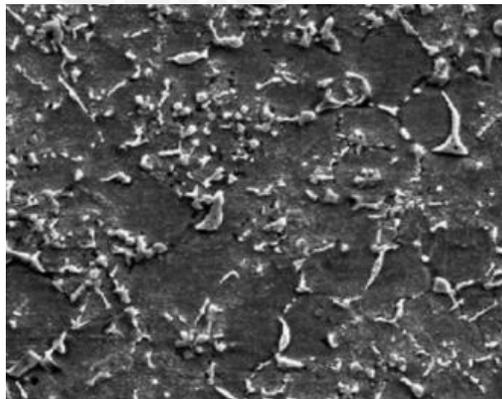


Figura 9. Microestructura de carburos dispersos de molibdeno [17].

### 1.2.3. Influencia de la composición química de los revestimientos de electrodos en la resistencia al desgaste

Los elementos presentes en el revestimiento del electrodo que se usan para realizar los recargues duros, definen las propiedades mecánicas del recubrimiento protector. Algunos elementos como el Ti, V, Mo y grafito influyen sustancialmente en la microestructura y la dureza del recargue duro.

Estudios recientes indican que la resistencia al desgaste puede ser mejorada cuando partículas duras son integradas a una matriz tenaz, donde las partículas actúan como puntos de apoyo para las superficies en movimiento relativo, reduciendo los coeficientes de fricción o previniendo el desgaste adhesivo [17].

X. Wang et al. realizaron un estudio de la influencia de la composición química del revestimiento de electrodos usados para Hardfacing en un acero AISI 1020. Los resultados que se obtuvieron se detallan a continuación.

#### 1.2.3.1. Grafito

Los efectos del grafito en la dureza y en la micrografía de las capas de los recubrimientos protectores se muestran en la Figura 10. Se puede apreciar que el aumento del contenido de grafito de las capas de los recubrimientos protectores incrementa la dureza rápidamente cuando el contenido de grafito es menor al 10%, y tiene un incremento ligero cuando el contenido está por encima de 10%. La microestructura también es afectada, pues el número de carburos crece con el incremento del contenido de grafito, así como el endurecimiento por solución sólida. Mientras que el contenido de grafito en el revestimiento es menor a 6%, no hay grafito suficiente para reaccionar con el Ti, V o Mo; solo se puede encontrar pocos carburos en las capas protectoras como se aprecia en la Figura 11a. En la Figura 11b y Figura 11c se puede apreciar cómo van apareciendo carburos en la microestructura conforme el grafito aumenta en porcentajes de 8% y 10% respectivamente. Sin embargo, cuando la cantidad de grafito está por encima de 12%, la microestructura de la matriz cambia a martensita con alto contenido de carbono, como se aprecia en la Figura 11d lo que trae como consecuencia una reducción en la resistencia a la fisuración de los recargues, ocasionando fisuras en las capas protectoras. La Figura 12 muestra este hecho. De acuerdo a las investigaciones hechas, se debe controlar la cantidad de grafito entre 8 y 10% [17].

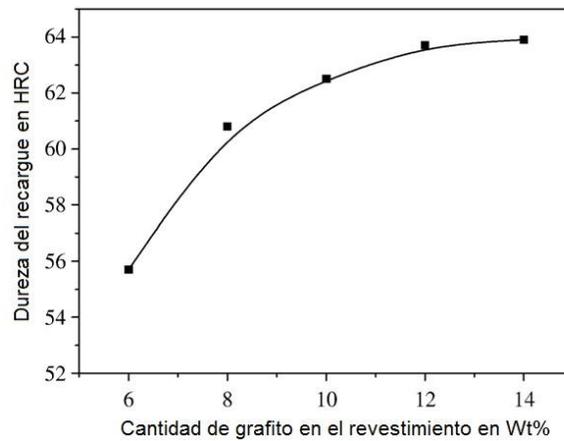


Figura 10. Efecto de la cantidad de grafito en la dureza del recargue duro (15% Fe-Ti, 12% Fe-V, 3% Fe-Mo) [17].

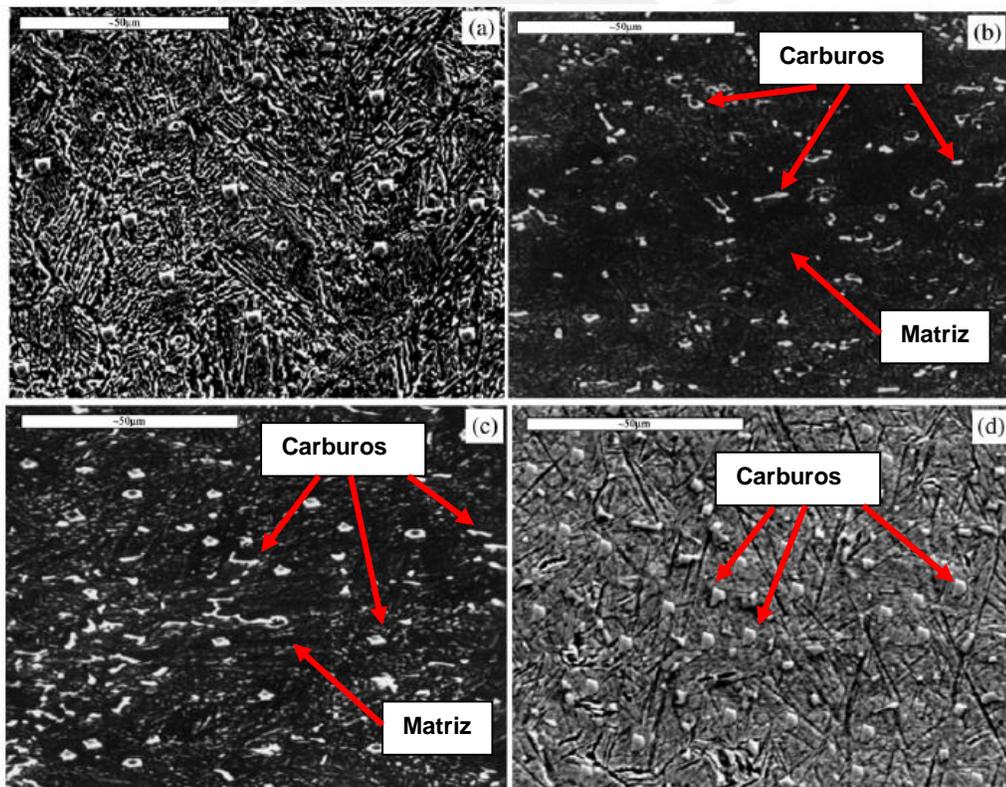


Figura 11. Efecto de la cantidad de grafito en la microestructura del recargue duro (15% Fe-Ti, 12% Fe-V, 3% Fe-Mo): (a) 6% grafito; (b) 8% grafito; (c) 10% grafito; (d) 12% grafito [17].

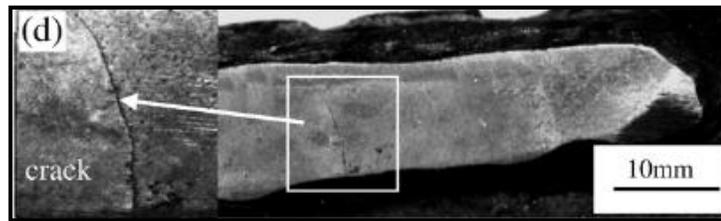


Figura 12. Fisuras en recargues duros [17].

### 1.2.3.2. Titanio y Vanadio

Ambos son fuertes formadores de carburos. La Figura 13 y la Figura 14 muestran la relación entre la dureza y el contenido de ferrotitanio (Fe-Ti) y ferrovanadio (Fe-V) respectivamente. Se puede apreciar que con el aumento de la cantidad de Fe-Ti y Fe-V, la dureza de los recargues duros aumenta. Esto se puede atribuir al incremento de la cantidad de carburo de titanio y carburo de vanadio (que poseen durezas aproximadas de 3200HV y 2800HV respectivamente), en los recargues y la alta dureza de estos carburos. Más aún, los carburos de titanio y vanadio tienen buena estabilidad térmica, lo que restringe el movimiento de los límites de granos previniendo que crezcan. Sin embargo, algunos carburos de titanio y vanadio permanecen en la escoria durante el proceso de solidificación, incrementando el punto de fusión y la viscosidad de ésta. La fluidez de la escoria, así como la facilidad de removerla disminuyen cuando las cantidades de Fe-Ti y Fe-V en el revestimiento del electrodo están por encima de 15% y 12% respectivamente. Inclusiones de escoria se encontraron en los recubrimientos protectores cuando el contenido de Fe-Ti y Fe-V en el revestimiento era 17% y 14% respectivamente, como se aprecia en la Figura 15 y la Figura 16. Por lo tanto, el Fe-Ti y el Fe-V deben ser controlados dentro de 12-15% y 10-12% respectivamente [17].

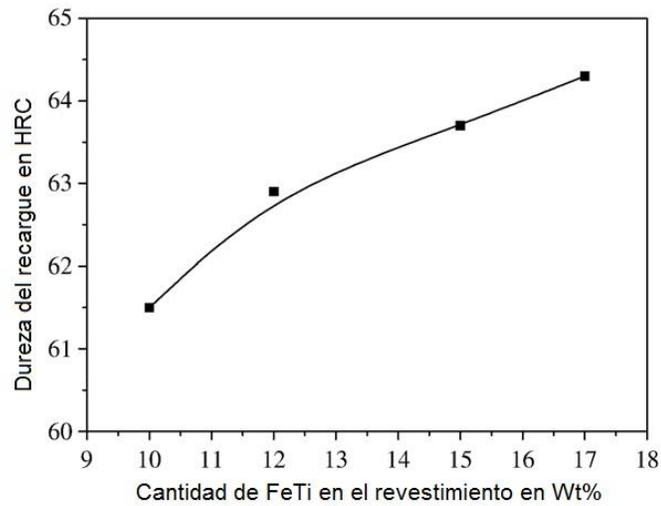


Figura 13. Efecto de la cantidad de Fe-Ti en la dureza del recargue duro (8% grafito, 12% Fe-V, 3% Fe-Mo) [17].

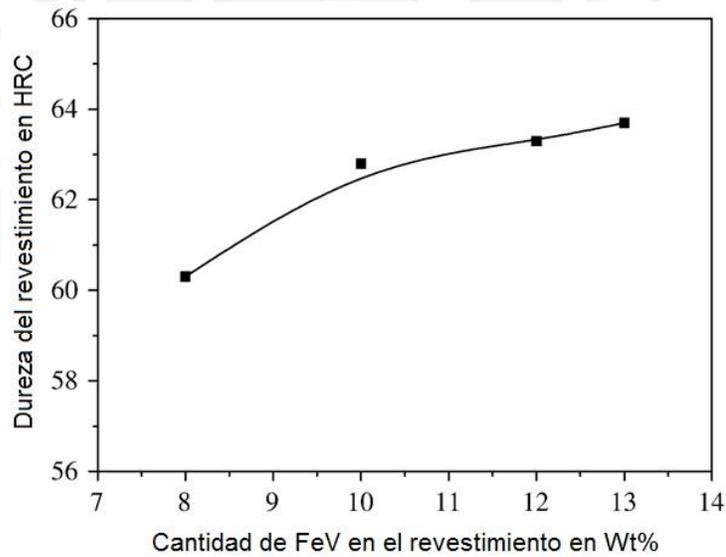


Figura 14. Efecto de la cantidad de Fe-V en la dureza del recargue duro (8% grafito, 15% Fe-Ti, 3% Fe-Mo) [17].

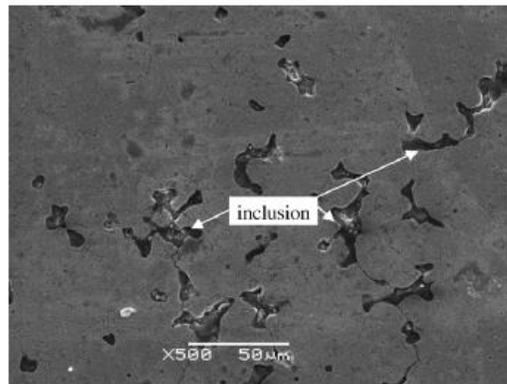


Figura 15. Imagen de una inclusión en el recargue duro (8% grafito, 17% Fe-Ti, 14% Fe-V y 3% Fe-Mo) [17].

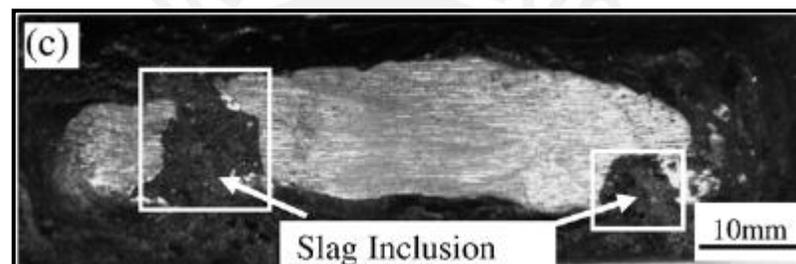


Figura 16. Macrografía de un recargue duro mostrando una inclusión de escoria [17].

### 1.2.3.3. Molibdeno

La adición de Mo conlleva a una situación compleja. El molibdeno, que es conocido por ser un elemento que endurece por solución sólida, también contribuye al endurecimiento por precipitación y formación de carburos. Las precipitaciones impiden el movimiento de las dislocaciones y favorecen un efecto de endurecimiento en las capas protectoras. Las Figura 17a y Figura 17b muestran la microestructura de las capas protectoras para 4% y 5% de Fe-Mo respectivamente. Comparada con la microestructura de los recargues duros de 4% de Fe-Mo, se puede apreciar que algunos carburos precipitaron en los límites de granos y formaron una estructura en forma de red con el aumento del contenido de Fe-Mo a 5%. También se puede apreciar que la sensibilidad a la fisuración aumenta con el incremento de Fe-Mo a valores por encima de 5%, como se muestra en la Figura 17c. Por esta razón, la cantidad de Fe-Mo debe ser controlada cerca a 4% [17]. La Figura 18 muestra el efecto del contenido de Fe-Mo en la dureza de los recargues duros. Se aprecia que la dureza de los recubrimientos aumenta con el incremento del contenido de Fe-Mo.

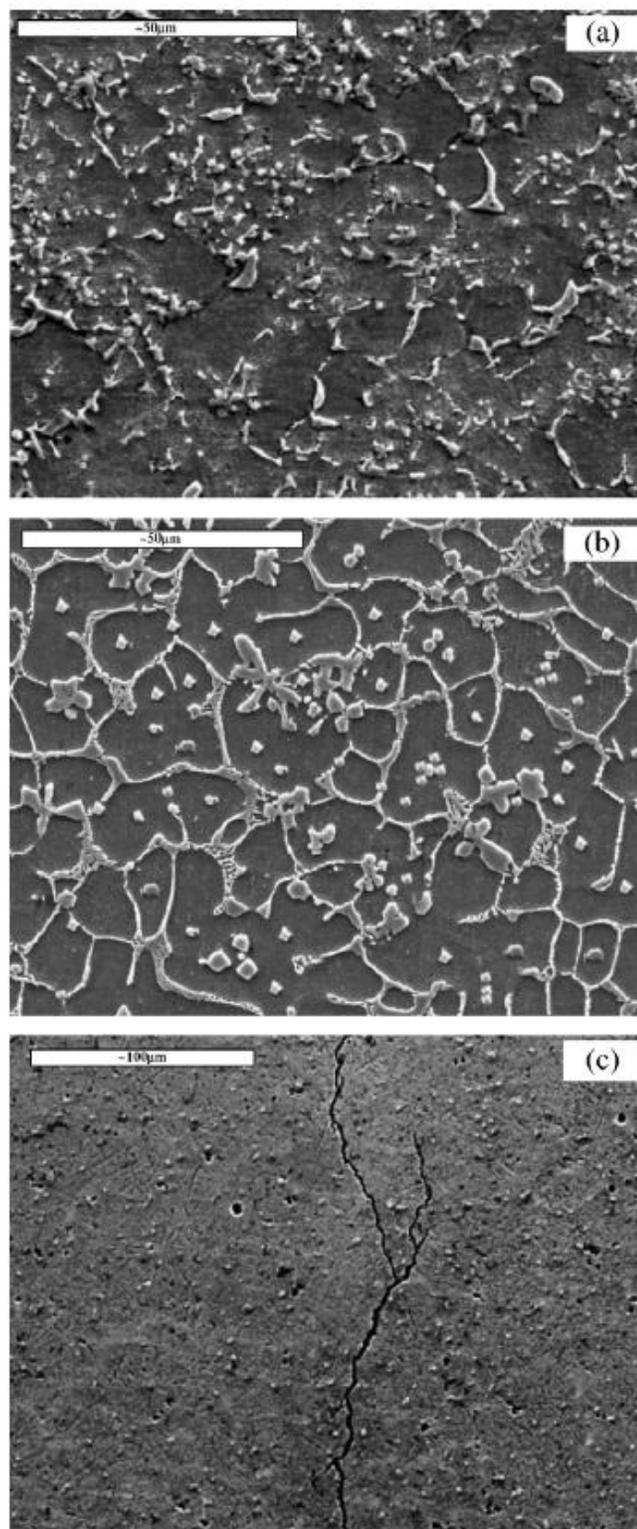


Figura 17. Efecto de la cantidad de Fe-Mo en la microestructura del recargue duro  
(a) 4% de Fe-Mo (b) 5% de Fe-Mo (c) >5% de Fe-Mo [17].

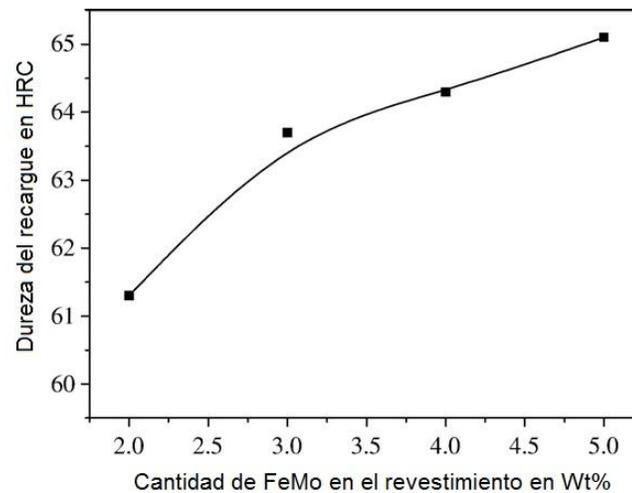


Figura 18. Efecto de la cantidad de Fe - Mo en la dureza del recargue (8% grafito, 15% Fe-Ti y 12% Fe-V) [17].

#### 1.2.4. Aplicación del recargue duro

Se debe tener en cuenta los siguientes aspectos durante la aplicación del recargue duro.

##### 1.2.4.1. Limpieza

Para obtener recubrimientos sanos es necesario que las superficies del metal base que serán tratadas se encuentren limpias antes de aplicar el recargue. Deben estar libres de pinturas, grasas, y suciedad. Para ello se aplicará algún tipo de solvente que facilite la remoción de esos contaminantes.

En caso de presentar óxidos o herrumbre la limpieza se deberá hacer con un esmeril manual. Si no se cuenta con un esmeril, la limpieza se puede realizar con cepillos de alambre. Defectos como porosidades y grietas se pueden presentar debido a la falta de una limpieza adecuada [15].

Si existen recargues antiguos, cuya naturaleza se desconoce, también se deben retirar con un proceso de esmerilado. De no realizarse esta limpieza puede existir incompatibilidad entre el nuevo recargue y el recargue antiguo, se puede generar porosidad, fisuración, o fragilidad por endurecimiento del recargue antiguo.

#### **1.2.4.2. Preparación de la superficie**

Cuando la superficie de la pieza de trabajo presenta fisuras, deformaciones u otros, se debe realizar un proceso de rectificado o mecanizado para eliminar cualquier tipo de discontinuidad que pueda afectar al proceso.

#### **1.2.4.3. Espesor del depósito**

Cuando se requiera más de una capa de recubrimiento en la superficie de una pieza, se debe tener especial cuidado en realizar una buena limpieza para remover la escoria que se genera en el cordón de soldadura y que ésta no quede atrapada entre las capas de cada pase. Si alguna escoria queda atrapada se producirán defectos en los recargues y las propiedades mecánicas no serán las esperadas.

Se debe evitar depositar excesivas capas de hardfacing pues puede ocasionar fisuras y despostillamiento en servicio. Si se requiere realizar depósitos gruesos, se puede recurrir a una “base amortiguadora o cojín” como elemento intermedio entre el metal base y el recargue duro. La ventaja de usar una base amortiguadora es que permite una mejor unión entre el metal base y el recubrimiento. Además actúa como un elemento que absorbe el impacto evitando el desprendimiento del recargue. Finalmente, reduce el grado de dilución que se puede presentar.

En general el espesor de los recargues duros no debe superar los 6 mm y las tres capas [15].

#### **1.2.4.4. Precalentamiento y temperatura interpase**

Para aceros con un porcentaje menor a 0.45% de carbono no se requiere precalentamiento.

No obstante, para aceros con un porcentaje mayor a 0.45% la soldabilidad es baja. Esto se debe a que el gradiente de enfriamiento en la soldadura es elevado y genera un temple en el material, obteniéndose microestructuras muy duras y frágiles como la martensita y la bainita inferior. Para evitar esta situación, se debe reducir el gradiente de enfriamiento realizando un precalentamiento en el material [15].

La excepción de la regla del precalentamiento de aceros para hardfacing son los aceros fundidos con alto manganeso que se deben de mantener fríos durante el proceso de

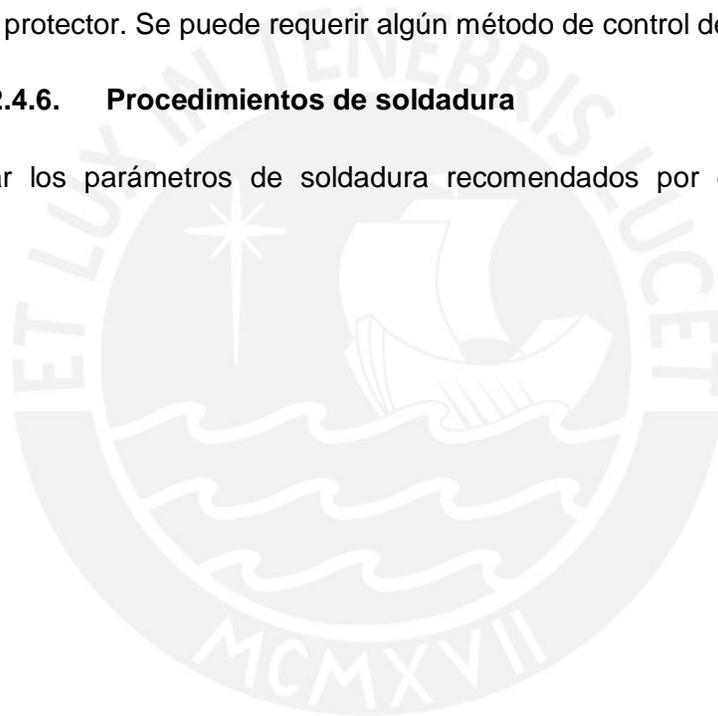
recubrimiento [15]. Esto debido a que el manganeso es un elemento ganmágeno, es decir formará austenita cuando solidifique. La gran cantidad de austenita sumada al precalentamiento hace que el acero fundido sea propenso a fisurarse en caliente. Por esta razón la temperatura entre pases para los aceros al manganeso no debe superar los 500°C [13].

#### **1.2.4.5. Deformaciones**

Se debe tener cuidado con las deformaciones que se puedan generar producto del calor excesivo. Estas deformaciones generan tensiones residuales que pueden fisurar el recubrimiento protector. Se puede requerir algún método de control de deformación.

#### **1.2.4.6. Procedimientos de soldadura**

Se debe usar los parámetros de soldadura recomendados por el fabricante de los electrodos.



## CAPITULO 2

### 2.1. PROCESO EXPERIMENTAL

Para evaluar la resistencia a la abrasión de las probetas a estudiar en esta tesis se ejecutaron ensayos mecánicos y ensayos de constitución. Se realizaron metalografías para conocer la microestructura de las probetas y poder relacionarlas con las propiedades mecánicas encontradas. Asimismo, se midió la dureza Vickers de las probetas, pues ésta es un indicador referencial de la resistencia al desgaste que ofrecen los materiales, no obstante no debe considerársele como el único indicador. Finalmente se realizó el ensayo de desgaste abrasivo, el cual evalúa la resistencia al desgaste de un material en un medio netamente abrasivo. Para ello se midió la diferencia de volumen de la probeta antes y después del ensayo. Esta diferencia de volumen se calculó empleando la densidad del material y la variación de masa de las probetas. La información obtenida de los ensayos y su análisis se detallan en el capítulo 3.

#### 2.1.1. Fabricación de probetas

Para la fabricación de probetas se depositaron los electrodos sobre la superficie de un acero ASTM A36 que sirvió como el metal base. Se soldaron cupones de donde se extrajeron probetas para realizar los ensayos de desgaste, dureza y metalografía.

##### 2.1.1.1. Composición química

Se fabricaron tres electrodos a los cuales se les asignó un código para poder diferenciarlos: V-0, con 0% de vanadio; V-085, con 0.85% de vanadio; y V-185, con 1.85% de vanadio. La composición química del revestimiento de los electrodos empleados se muestra en la Tabla 6

Tabla 6. Composición química del revestimiento de los electrodos empleados.

Probeta	V-0	V-085	V-185
FeTi	5	5	5
FeV	0	0.85	1.85
Grafito	0	0	0

### 2.1.1.2. Dimensiones de las probetas

Las dimensiones de las probetas para el ensayo de desgaste que recomienda la norma ASTM G65-04 (2010) [18] son 25.4 mm de ancho, 76.2 mm de largo y un espesor que puede variar entre 3 mm y 12.7 mm. No obstante, el tamaño de la probeta puede ser variado de acuerdo a las necesidades de cada ensayo, siempre y cuando la longitud y ancho de la probeta sean las suficientes para que la huella esté dentro de la superficie de la probeta.

La norma ASTM G65-04 (2010) también establece que la superficie a analizar debe ser lisa, plana y libre defectos como porosidades. La planitud de la superficie debe ser de 0.125 mm como máximo. Además de que es en esas condiciones como va a trabajar en servicio.

La elevada dureza del recubrimiento protector restringió el maquinado de la superficie de las probetas, exhibiendo estas el clásico perfil de un cordón de soldadura, tal como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Probetas para ensayo de desgaste.

Se obtuvieron probetas con las siguientes dimensiones promedio: 27,3 x 49,91 x 19,32 mm. En la Tabla 7 se muestran los valores promedios de las dimensiones de las probetas que se ensayaron.

Tabla 7. Dimensiones promedio de las probetas para el ensayo de desgaste.

Probeta		Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)
V-185	A	24.53	49.35	18.56
	B	26.38	49.15	18.80
	C	30.64	49.07	19.14
V-085	A	26.62	49.46	16.38
	B	26.95	50.43	19.39
	C	30.38	49.39	19.22
V-0	A	24.21	51.25	20.59
	B	25.82	50.63	21.45
	C	30.16	50.49	20.38

### 2.1.1.3. Procedimiento de soldadura

Para el soldeo de los cupones se empleó como material base un acero ASTM A36. Los electrodos que se fabricaron fueron de 5 mm de diámetro y se utilizó un proceso de soldadura de arco eléctrico manual (SMAW) con un total de 3 capas. En la Tabla 8 se puede apreciar los parámetros de soldeo empleados. Una vez soldados los cupones se

les dejó enfriar en un recipiente con cal para reducir la velocidad de enfriamiento y evitar posibles grietas y deformaciones.

Tabla 8. Parámetros de soldadura para el soldeo de cupones.

<b>Material Base</b>	ASTM A 36
<b>Material Aporte</b>	V-0, V-085, V-185
<b>Diámetro</b>	5.00 mm
<b>Amperaje</b>	180 - 190 A
<b>T° Interpase</b>	120 - 150 °C
<b>Vel. Avance</b>	3 - 4 cm/min
<b>Polaridad</b>	DCEP
<b>N° Capas</b>	3

### 2.1.2. Ensayo de desgaste

El ensayo para evaluar el desgaste utilizado en esta investigación es el “Método de Ensayo Estandarizado para la Medición de Abrasión usando un Equipo de Rueda de Caucho con Arena Seca” según la norma ASTM G65-04 (2010) [18]. Este método de ensayo evalúa la resistencia al desgaste por abrasión de materiales metálicos procurando producir resultados cuantitativos que permitan comparar diferentes materiales, siempre bajo un conjunto de condiciones particulares.

La norma ASTM G65-04 (2010) recomienda 5 tipos de procedimientos de ensayo para materiales con diferentes grados de resistencia al desgaste o espesor de la probeta. Los resultados del ensayo se presentan como una pérdida de volumen, en milímetros cúbicos, para el procedimiento de ensayo elegido.

A continuación se da una breve descripción de los diferentes procedimientos de la norma.

- **Procedimiento A:** Se emplea para materiales con una resistencia a la abrasión que varía de media a extrema.

- **Procedimiento B:** Es una variación del procedimiento A. Se usa para materiales con una resistencia a la abrasión que varía entre baja y media. Este procedimiento debe ser usado cuando la diferencia de volumen excede los 100 mm<sup>3</sup>.
- **Procedimiento C:** Es una variación del procedimiento A de menor tiempo. Se usa para recubrimientos delgados.
- **Procedimiento D:** Es una variación del procedimiento A con menor carga. Se usa para materiales de baja resistencia.
- **Procedimiento E:** Es una variación del procedimiento B de menor tiempo que se usa para materiales con una resistencia a la abrasión mediana a baja.

La Tabla 9 presenta los parámetros (tiempo, fuerza, revoluciones, distancia recorrida) de los diferentes procedimientos.

Tabla 9. Parámetros de los diferentes procedimientos del ensayo de desgaste [18].

Procedimiento	Tiempo (min)	Fuerza (N)	Revoluciones	Distancia recorrida (m)
A	30	130	6000	4309
B	10	130	2000	1436
C	0.5	130	100	71.8
D	30	45	6000	4309
E	5	130	1000	718

La máquina para el ensayo de desgaste consiste en un equipo cuyo esquema se muestra en la Figura 20. Como se puede apreciar en la figura, en la tolva se carga el material abrasivo y se deja caer a través de un conducto entre la probeta a analizar y la rueda de caucho giratoria. La probeta se presiona contra la rueda de caucho que está girando con la ayuda de un brazo de palanca para que el flujo controlado de arena realice la abrasión en la superficie de la misma. El tiempo de ensayo y la magnitud de la fuerza con que se presiona la probeta dependen del tipo de procedimiento a usar. Sin embargo, para todos los procedimientos el principio para medir el desgaste es la pérdida de volumen, que se medirá de manera indirecta empleando la densidad de la probeta y la pérdida en masa de la misma.

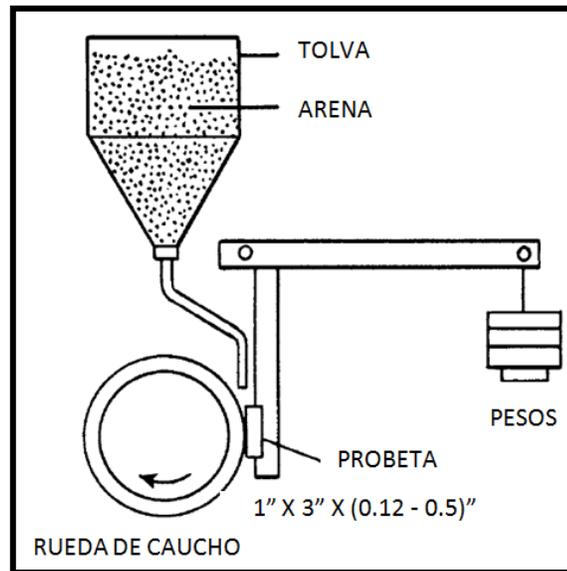


Figura 20. Esquema de la máquina de abrasión [18].

Se realizaron pruebas preliminares para determinar el procedimiento de ensayo a emplear. Debido a la alta dureza de los recubrimientos protectores, inicialmente se optó por seleccionar el procedimiento A que mide resistencia de materiales que varían entre media y extrema, no obstante la diferencia de masas promedio al inicio y final del ensayo fue de 3.4943 gramos (448 mm<sup>3</sup>). Por esta razón, se eligió el procedimiento B para realizar los ensayos.

#### 2.1.2.1. Equipo de desgaste abrasivo según ASTM G65-04 (2010)

Se utilizó el equipo de desgaste abrasivo del Laboratorio de Materiales de la PUCP. Como se puede apreciar en la Figura 21, el equipo consta de los siguientes elementos:

- Tolva
- Manguera para arena
- Rueda con la periferia de caucho
- Porta probetas
- Juego de Pesas
- Mecanismo de brazo de palanca

- Motoreductor coaxial de engranajes helicoidales marca Sew (no aparece en la imagen)

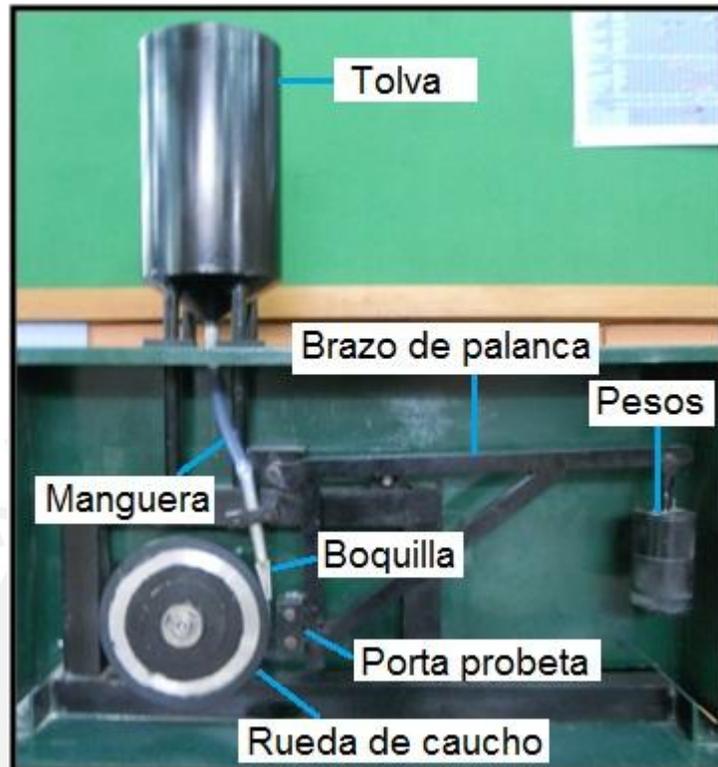


Figura 21. Máquina de desgaste abrasivo según ASTM G65-04 (2010).

#### 2.1.2.1.1. Rueda de caucho

La rueda que se usa para el ensayo es un disco de acero en cuya periferia se ha aplicado una capa de caucho moldeado. El caucho sin curar debe unirse al disco y ser curado en un molde de acero. El material debe ser clorobutil con las especificaciones mostradas en la Tabla 10. El espesor del recubrimiento de caucho debe ser de  $\frac{1}{2}$ " pulgada y el diámetro exterior de la rueda debe ser 9".

La dureza del caucho debe oscilar entre 58 y 62 Shore A. En caso la dureza medida no se encuentre en este rango se deberá indicar en la hoja de resultados.

Tabla 10. Composición química de la rueda de caucho que recomienda la norma ASTM G65-04.

Material	Proporciones por peso
Clorobutil No. HT 10-66	100
Agerite Staylite-S	1
HAF black	60
Aceite circolight	5
Ácido esteárico	1
Óxido de Zinc	5
Ledate	2

#### 2.1.2.1.2. Boquilla para arena

La boquilla puede ser de cualquier longitud conveniente que permita una adecuada conexión con la tolva de alimentación de arena por medio de una manguera plástica. El flujo de arena debe estar comprendido en el rango de 300 a 400 g/min. Este flujo se puede ajustar rectificando el orificio de la boquilla para aumentar el ancho de abertura y de esta forma varíe el flujo.

La norma ASTM G65-04 (2010) presenta un esquema con las dimensiones recomendadas para la fabricación de la boquilla.

Durante el ensayo la abertura de la boquilla debe estar lo más cerca posible a la unión de la probeta y la rueda de caucho como se muestra en la Figura 22.

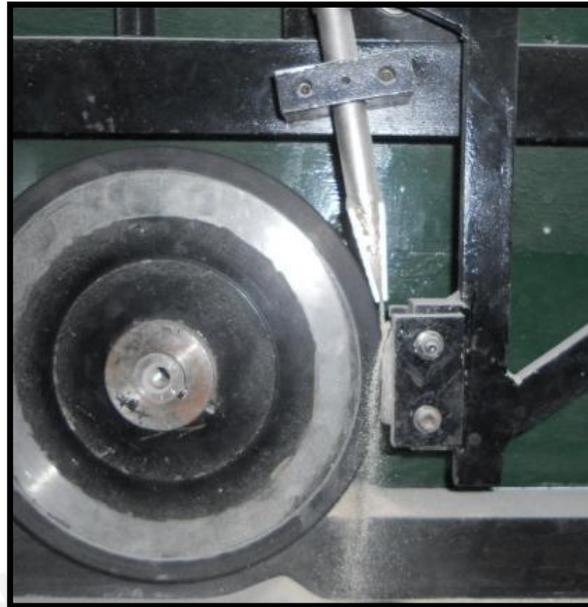


Figura 22. Posición de la boquilla, probeta y rueda de caucho.

#### 2.1.2.1.3. Motorreductor

La velocidad y potencia de ensayo según norma será de  $200 \pm 10$  RPM y 1 HP respectivamente. Para ello se usará un motorreductor coaxial de engranajes helicoidales de la marca SEW.

#### 2.1.2.1.4. Temporizador

De acuerdo a la norma ASTM G65-04 (2010), el parámetro que se debe medir para evaluar el desgaste es la distancia recorrida por la rueda de caucho en la superficie de la probeta. Por esta razón se recomienda emplear un contador de vueltas para determinar la distancia que recorre la rueda. Sin embargo, la máquina de desgaste del Laboratorio de Materiales de la PUCP no posee un contador pero sí un temporizador para determinar con exactitud el tiempo de ensayo. Con el temporizador se puede controlar de manera aproximada la distancia recorrida con la siguiente fórmula:

$$D = n \times \pi \times d \times t$$

Donde:

- $D$  = Distancia recorrida por la superficie de la probeta en metros
- $n$  = Velocidad de la rueda en RPM
- $d$  = Diámetro exterior de la rueda de caucho en metros
- $t$  = Tiempo de ensayo en minutos (10 minutos)

### 2.1.2.2. Material abrasivo

El material abrasivo recomendado por la norma ASTM G65-04 (2010) es la arena de Ottawa. Esta arena es un tipo de arena de casi 100% de sílice con un tamaño de grano comprendido entre las mallas 50 y 70 [6]. Cuando se observa la arena de Ottawa con un microscopio se puede observar que presenta una morfología de granos redondeados poco angulosos como se puede apreciar en la Figura 23. Para realizar el ensayo la arena debe ser secada en un horno a 120 °C por una hora aproximadamente [18].

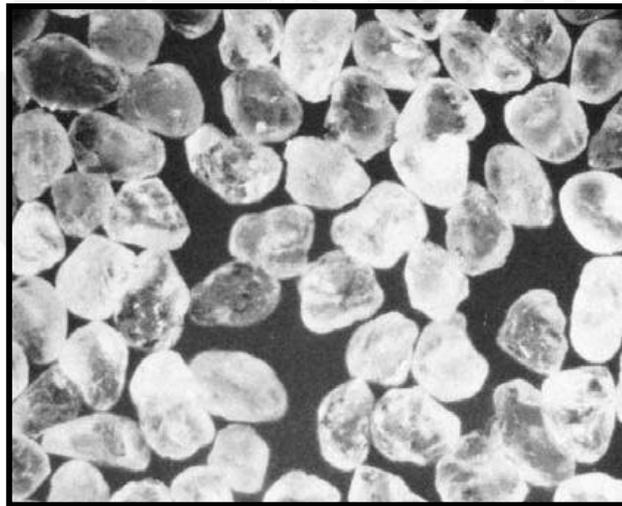


Figura 23. Arena de Ottawa [18].

Debido a que la arena de Ottawa únicamente se produce en la ciudad estadounidense de Illinois y que los costos implicados para su adquisición son elevados, se optó por emplear una arena de propiedades similares para la realización de los ensayos. Dentro de las opciones que se encontraron se eligió arena de fundición del Laboratorio de Manufactura

de la PUCP, ya que presentaba características muy similares [19]. En la Figura 24 se aprecia la comparación de morfologías de la arena de Ottawa y la arena de fundición.

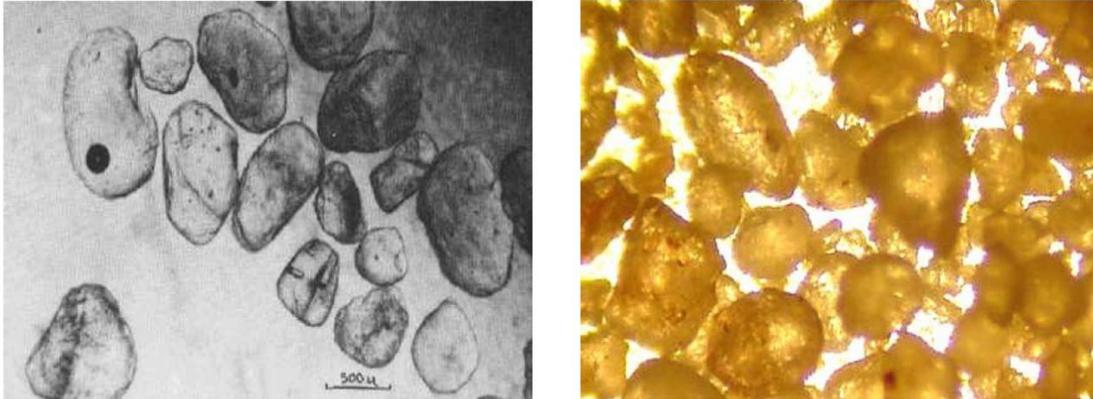


Figura 24. Comparación entre la arena de Ottawa (Izq.) y arena de fundición (Der.) [19].

#### 2.1.2.2.1. Medición de la humedad de la arena de fundición

Para conocer el porcentaje de humedad presente en la arena de fundición empleada se realizó un ensayo de secado de arena. Dicho ensayo consistió en pesar 100 gramos de la arena en un recipiente de vidrio. Seguidamente se introdujo el recipiente en un horno a una temperatura de 120 °C por una hora para luego pesar nuevamente la arena. El horno que se usó es de la marca Heraeus perteneciente al Laboratorio de Fundición de la PUCP. En la Figura 25 se puede apreciar una imagen del horno empleado

Se encontró que en una hora el peso era aproximadamente igual, por lo que se repitió el ensayo por una hora más. En esta oportunidad se encontró que el peso de arena era de 99 gramos, es decir, hubo una variación en masa de 1 gramo. De aquí se obtuvo que el porcentaje de humedad de la arena de fundición era de 1%.



Figura 25. Horno para el secado de arena del Laboratorio de Fundición PUCP.

#### 2.1.2.2.2. Medición del porcentaje de impurezas de la arena de fundición

Para medir la cantidad de impurezas (arcilla, bentonita, etc.) presentes en la arena de fundición se realizó un ensayo de levigación. Dicho ensayo consiste en separar las impurezas mediante el uso de un equipo llamado levigador como el que se muestra en la Figura 26. El levigador es un agitador de diseño tal que al girar no rompe los granos de arena y suspende las impurezas en el agua.

El ensayo se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se colocó 50 gramos de arena en un vaso de vidrio especial como el que se muestra en la Figura 26.
2. Se agregó 475 mL de agua destilada.
3. Se encendió el equipo y se dejó centrifugar por un periodo de 1 hora.
4. Se dejó reposar por un período de 15 minutos como se aprecia en la Figura 27.
5. Se extrajo el agua en exceso con la ayuda de un sifón hasta una altura aproximada de 1 pulgada por encima de la arena.
6. Se repitió el proceso 3 veces hasta que el agua tuvo una apariencia cristalina.
7. Se secó y pesó la arena.
8. Se midió la variación de masa.



Figura 26. Levigador.

Luego de realizar el ensayo de levigación se encontró que el peso de la arena fue de 49 gramos. Con este resultado se puede decir que el porcentaje de impurezas de la arena de fundición fue de 2%.



Figura 27. Arena reposando.

Debido a que la arena presentaba bajos porcentajes de humedad e impurezas se puede considerar que la arena a emplear era apta para el ensayo de desgaste.

### 2.1.2.3. Procedimiento

Para realizar el ensayo se tomó en cuenta el procedimiento desarrollado por Erni [19], con ligeras variaciones. A continuación se detalla el procedimiento utilizado para la realización del ensayo de desgaste abrasivo.

1. Usar arena de fundición cernida por un tamiz de 0.71 mm para tener un tamaño de grano uniforme.
2. Tomar entre 3 y 5 medidas de dureza Vickers en la probeta, ver Figura 28, en una zona alejada de la parte central pues ahí se producirá la huella de desgaste. Se puede realizar la medición cerca a los bordes de la probeta.
3. Colocar la muestra en un vaso de precipitados lleno de acetona dentro del equipo limpiador ultrasónico durante 10 minutos como se aprecia en la Figura 29. Luego se secará con un secador eléctrico.



Figura 28. Durómetro Vickers para el ensayo de dureza.

4. Pesar la probeta con una precisión de 0.001 gramos, como se aprecia en la Figura 30, excepto para el procedimiento C cuya precisión será de 0.0001 gramos.



Figura 29. Limpieza de probetas con limpiado ultrasónico.

5. Medir la dureza de la rueda de caucho antes de cada ensayo. Esta medición de dureza se realiza con un durómetro Shore en la escala A de acuerdo al método de ensayo ASTM D 2240 [18]. Se debe tomar un mínimo de 4 mediciones a 90° de separación entre ellas. Para que el ensayo sea válido, la dureza debe estar en un

rango comprendido entre 58 a 62 Shore A. La lectura de datos se realiza 5 segundos después de cada indentación.



Figura 30. Balanza digital para el pesado de las probetas.

En caso de no encontrarse en el rango, se podrá proseguir con la prueba mientras se especifique en el reporte esta irregularidad. Como medida correctiva se podrá tratar el recubrimiento de caucho de acuerdo a los procedimientos de la norma ASTM G 65. Además, se medirá el diámetro total y espesor de la rueda, indicando todo esto en la hoja de datos.

6. Asegurar las probetas al extremo de la palanca por medio de sus mordazas.
7. Poner las pesas necesarias para el procedimiento (A, B, C, D o E) adecuado al material a desgastar, indicando el procedimiento en la hoja de datos.
8. Fijar el tiempo estimado para el procedimiento en el temporizador dentro del sistema de control. Esto se calcula de acuerdo a la longitud de desgaste dependiendo del procedimiento especificado en la norma ASTM G 65, y el diámetro de la rueda.
9. Cargar la tolva con abrasivo para obtener un flujo másico de arena y no iniciar el ensayo hasta obtener un flujo uniforme y no turbulento. Para esto se debe usar una mascarilla de polvo para evitar respirar la polvareda que se genera en el

- ambiente. Además verificar que la boquilla de la tobera de descarga no se obstruya.
10. Medir el flujo másico durante al menos 1 minuto y anotarlo en la hoja de datos.
  11. Encender el motor de la máquina y liberar el pin que sostiene el brazo de palanca y llevar la probeta suavemente a la posición de contacto con el flujo de abrasivo, teniendo cuidado en que el contacto sea lo más tangente posible. Esto se logra aflojando los pernos del motor y de las planchas deflectoras de aire, para luego deslizarlos hasta garantizar la mejor tangencia posible en el contacto rueda-abrasivo-probeta.
  12. Con la ayuda de un tacómetro medir las revoluciones del motor a través del eje motriz, y anotarlo en la hoja de datos como se muestra en la Figura 31.
  13. Hermetizar totalmente la máquina y observarla por un tiempo mínimo de 5 minutos para ver algunas posibles fugas del polvillo que se suelta del abrasivo como se puede ver en la Figura 32. Dejar que proceda el ensayo.
  14. Al apagarse el motor se procederá abrir la máquina. Tener cuidado ya que el polvillo es peligroso para la salud. Para ello usar una mascarilla de polvo.
  15. Colocar el pin de la palanca en la posición de reposo.
  16. Medir el flujo másico de abrasivo antes de cerrarlo. Promediar junto con la medida tomada antes de comenzar el ensayo, para colocarlo en la tabla de datos.



Figura 31. Medición de la velocidad de la rueda de caucho.

17. Esperar alrededor de 30 minutos para que la rueda de caucho se enfríe hasta temperatura ambiente antes de proceder con el siguiente ensayo.
18. Pesar la probeta con una precisión de 0.001 gramos (0.0001 gramos para el procedimiento C). Previamente se procederá con la limpieza de acuerdo a los puntos 4 y 5 de este procedimiento.



Figura 32. Hermetizado de la máquina de desgaste durante el ensayo.

19. Observar la huella de desgaste. En caso que la huella no sea uniforme, se deberá alinear mejor la rueda y verificar su forma antes de proceder a otro ensayo, ya que

esto afecta los resultados de la prueba. En la medida de lo posible se deberá repetir el ensayo.

20. Se podrán ejecutar ensayos interrumpidos para determinar si se encuentran transiciones durante el ensayo, debido a efectos del daño de la superficie.
21. Para los casos de ensayos interrumpidos se tabulará una tabla de pérdida de masa de la probeta contra el tiempo transcurrido hasta ese momento. Se tabulará un punto tantas veces se detenga el ensayo.

### 2.1.3. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realizó en todas las muestras de acuerdo al “Método de ensayo estandarizado para dureza Knoop y Vickers de materiales” según ASTM E384-11 [20].

Las probetas que se emplearon para el ensayo son como las que se muestran en la Figura 33. Como se puede apreciar la probeta consiste en un corte transversal que está formado por tres elementos principales: la soldadura o recargue, la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base (ASTM A36).

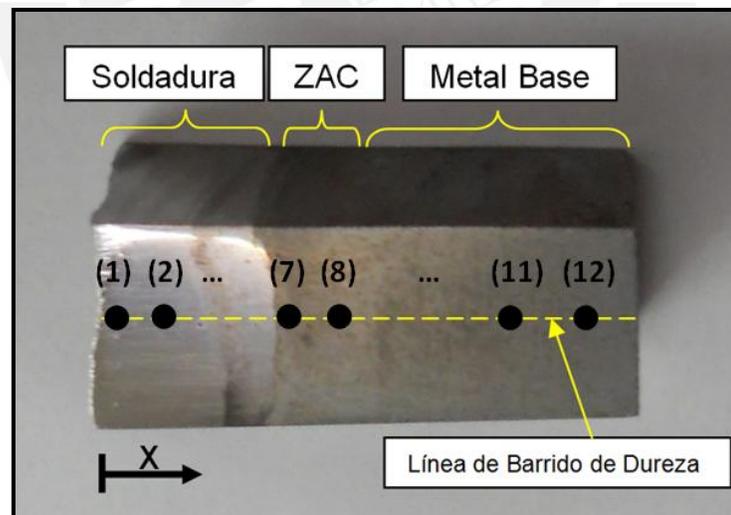


Figura 33. Probeta para ensayo de dureza.

En la probeta se trazó una línea y se tomaron durezas a lo largo de esta línea en puntos representativos de cada una de las zonas mostradas en la Figura 33, para observar como variaba la dureza. En el extremo izquierdo se tomó la primera medida en la zona que corresponde al recargue duro, luego se tomaron más mediciones en el recargue, ZAC y metal base como se aprecia en la Figura 33. Se utilizó un durómetro Vickers como el que se muestra en la Figura 28 con una carga de 10 kilogramos.

Asimismo, se mecanizaron las superficies de la última capa de los recargues para crear superficies planas y poder tomar la dureza de las mismas, ya que esta es la capa que soportará el desgaste abrasivo, por lo que es de gran importancia.

Los resultados obtenidos se muestran en el Capítulo 3 de esta tesis.

#### 2.1.4. Análisis metalográfico

Para realizar el análisis metalográfico se tomaron muestras representativas que contenían las tres zonas que se muestran en la Figura 33: recargue, ZAC y metal base. Estas muestras se cortaron con un disco de corte abrasivo DISCOTOM, procurando tener todas las zonas mencionadas. Una vez obtenidas las muestras, estas se montaron en briquetas de resinas termoendurecibles para proceder a su desbaste fino y pulido en pulidoras mecánicas como las de la Figura 34.



Figura 34. Pulidora mecánica marca Struers.

Para revelar la microestructura de las probetas se usaron diferentes reactivos tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Reactivos utilizados para la metalografía [21].

Reactivo	Composición Química
Nital al 3%	3 mL de HNO <sub>3</sub> y 97 mL de Alcohol
Cloruro Férrico	3 g FeCl <sub>3</sub> y 100 mL H <sub>2</sub> O
Beraha	3 g K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 10g Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y 100 mL H <sub>2</sub> O

Se debe mencionar que un solo reactivo no permitía visualizar las diferentes fases de las microestructuras involucradas. Por esta razón se atacaron las probetas por zonas para visualizar por partes los microconstituyentes de las muestras.

El Nital al 3% se utilizó para contrastar los granos de ferrita con los de perlita. Este reactivo revela los límites de grano de la ferrita, que son equiaxiales claros, y oscurece a la perlita. Asimismo, permite revelar la existencia de redes de carburos en los límites de grano. También se puede visualizar la austenita retenida y martensita con el Nital [21].

El cloruro férrico se utiliza para revelar la microestructura de aceros aleados. Permite visualizar carburos en caso existiesen [21]. Como los electrodos contienen FeV y FeTi se esperaba encontrar algún tipo de carburo en la microestructura por la alta tendencia del Vanadio y Titanio a formar carburos.

Estos dos reactivos, Nital y Cloruro Férrico se utilizaron en la probeta V-185 (1.85 % FeV). Los resultados se muestran en el capítulo 3.

El reactivo Beraha se utilizó en las tres probetas. Este reactivo tiene la particularidad de colorear las siguientes microestructuras: ferrita, perlita, martensita y bainita [21]. No afecta a la cementita en caso de existir. Igualmente, los resultados se muestran en el capítulo 3.

## CAPÍTULO 3

### 3.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1.1. Resultados

##### 3.1.1.1. Análisis químico

En la Tabla 12 se puede apreciar los resultados del análisis químico que se realizó a los 3 recargues. Se puede apreciar que los recargues presentan alta concentración de manganeso y cromo. Asimismo, todos los recargues presentan alto porcentaje de carbono para aumentar la dureza de los mismos.

El contenido de Vanadio aumenta con el aumento del porcentaje de Vanadio en el revestimiento de los electrodos. Por ejemplo para la probeta V-085 (0.85% de Vanadio en el electrodo) el porcentaje de Vanadio en el recargue es de 0.305%; y para la probeta V-185 (1.85% de Vanadio en el electrodo) el porcentaje de Vanadio en el recargue es de 0.707%.

Tabla 12. Composición química de los recargues duros depositados sobre el metal base.

Probeta	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V
V-0	0.619	0.964	0.0059	0.0186	2.212	0.046	6.862	0.435	0.031
V-085	0.579	0.882	0.0065	0.0179	2.083	0.043	6.237	0.389	0.305
V-185	0.616	0.743	0.0069	0.0187	2.162	0.046	6.877	0.428	0.707

Probeta	Cu	W	Ti	Al	Fe
V-0	0.047	0.013	0.058	0.0120	88.65
V-085	0.044	0.010	0.049	0.0118	89.31
V-185	0.047	0.006	0.028	0.0076	88.28

##### 3.1.1.2. Ensayo de dureza

Se realizaron barridos de dureza como se menciona en el capítulo 2. Se tomaron varios puntos en las 3 zonas que indica la Figura 33, para medir su dureza Vickers según la norma ASTM E384 -11. Luego se halló la dureza promedio de cada zona.

En la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 se pueden apreciar los resultados de los barridos dureza de las probetas V-0 (0% FeV), V-085 (0.85% FeV) y V-185 (1.85% FeV) respectivamente.

Tabla 13. Barrido de dureza probeta V-0.

<b>PROBETA V-0 / 0% FeV</b>			
	<i>Ensayo</i>	<i>HV</i>	<i>HV Prom</i>
<b>Recargue duro</b>	1	492.7	550.2
	2	468.3	
	3	619.6	
	4	550.7	
	5	616.0	
	6	553.7	
<b>ZAC</b>	7	137.3	141.3
	8	143.9	
	9	142.7	
<b>Metal base</b>	10	135.8	137.5
	11	140.7	
	12	135.8	

Tabla 14. Barrido de dureza probeta V-085.

<b>PROBETA V-085 / 0.85% FeV</b>			
	<i>Ensayo</i>	<i>HV</i>	<i>HV Prom</i>
<b>Recargue duro</b>	1	605.5	576.2
	2	553.7	
	3	533.1	
	4	612.5	
<b>ZAC</b>	5	146.7	148.8
	6	150.9	
<b>Metal base</b>	7	142.3	142.9
	8	150.1	
	9	143.5	
	10	135.8	

Tabla 15. Barrido de dureza probeta V-185.

<b>PROBETA V-185 - 1.85% FeV</b>			
	<i>Ensayo</i>	<i>HV</i>	<i>HV Prom</i>
<b>Recargue duro</b>	1	533.1	536.6
	2	477.8	
	3	559.8	
	4	544.8	
	5	536.0	
	6	533.1	
	7	544.8	
	8	562.9	
<b>ZAC</b>	9	172.4	167.6
	10	162.8	
<b>Metal base</b>	11	156.7	147.6
	12	153.6	
	13	142.3	
	14	137.7	

Con los datos obtenidos de los barridos de dureza se pueden obtener los perfiles de dureza que muestran la Figura 35, Figura 36 y Figura 37 para las diferentes probetas.

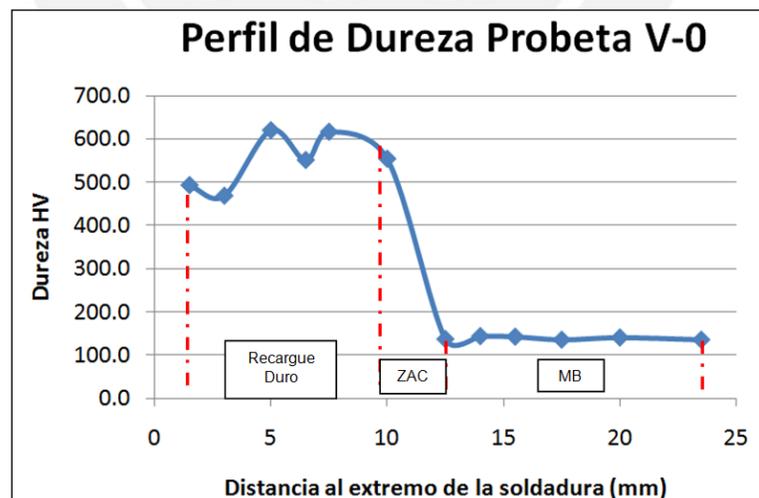


Figura 35. Perfil de dureza de la probeta V-0.

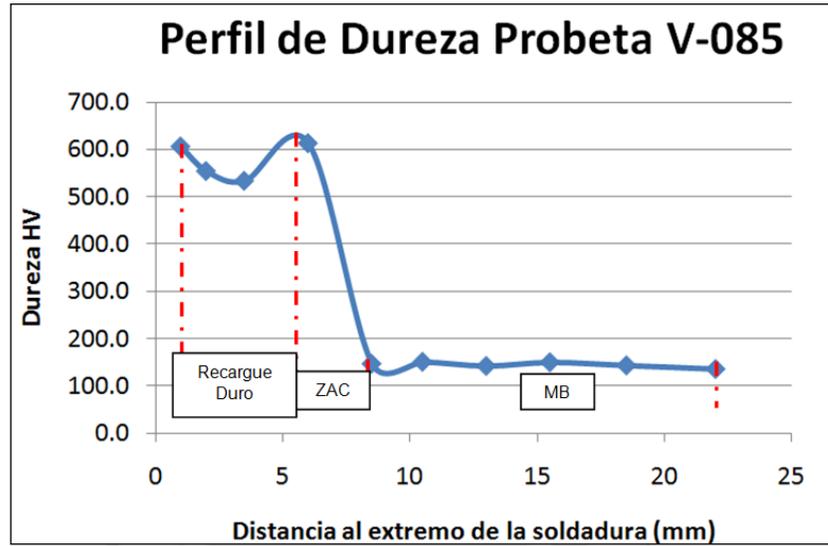


Figura 36. Perfil de dureza probeta V-085.

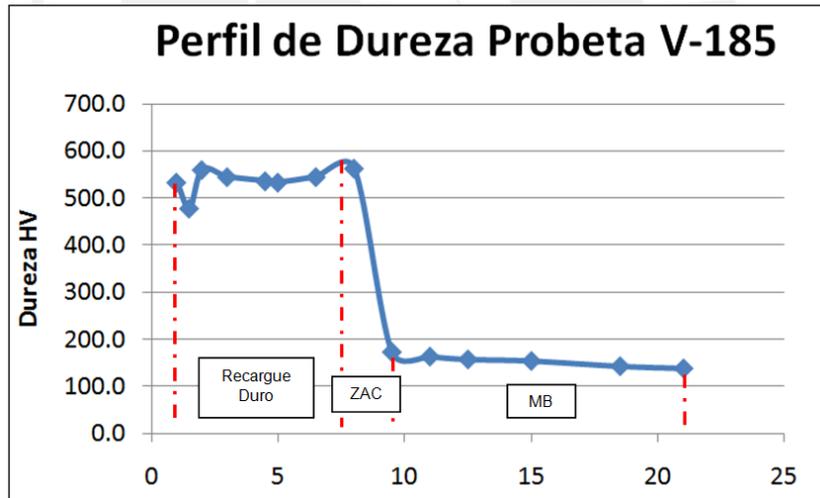


Figura 37. Perfil de dureza probeta V-185.

Como es de esperarse el perfil de dureza para los tres casos muestra una dureza elevada en las zonas donde existe recargue duro y esta disminuye conforme se acerca al metal base. Los valores de dureza promedio obtenidos para las probetas V-0, V-085 y V-185 son 550.2 HV, 576.2 HV 536.6 HV respectivamente.

Por otro lado, en la Figura 38 se puede apreciar una comparación de los perfiles de dureza de todas las probetas.

En la Figura 39 se puede observar la relación que existe entre la dureza promedio del recargue duro en una sección que incluye las 3 capas de recargue y la composición química del revestimiento del electrodo.

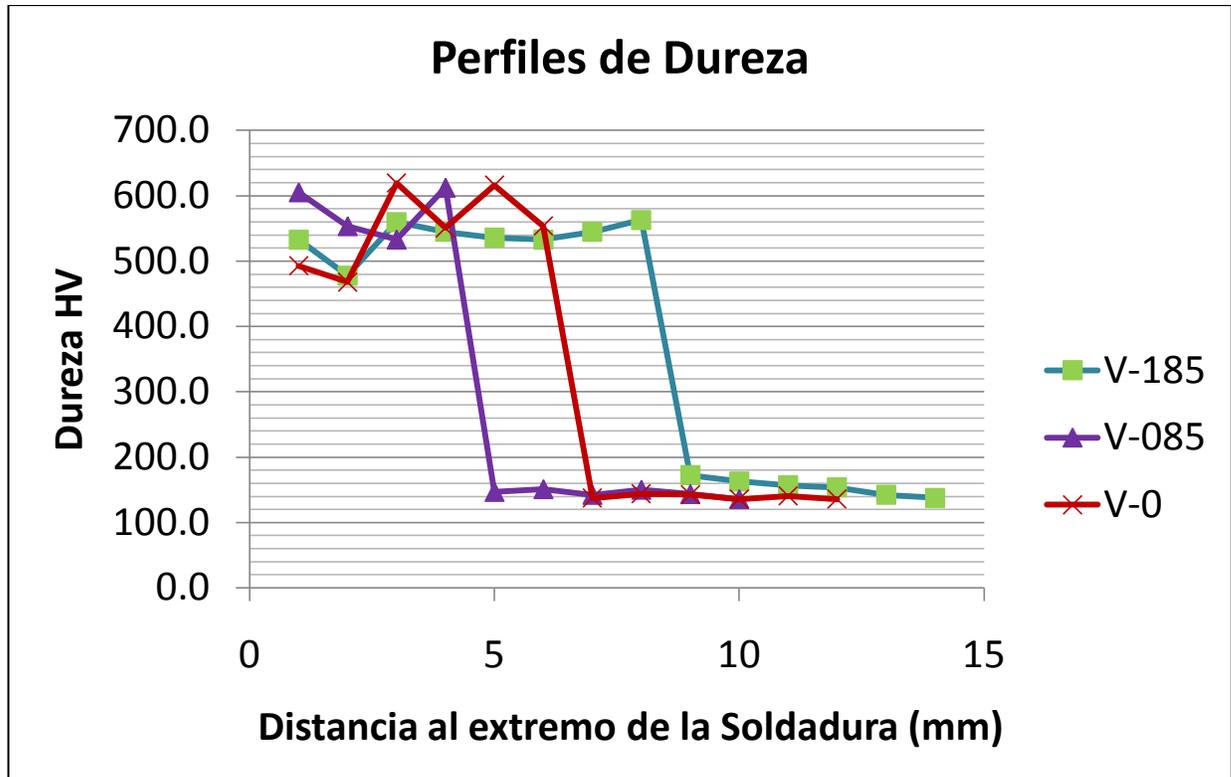


Figura 38. Comparación de perfiles de dureza entre probetas.

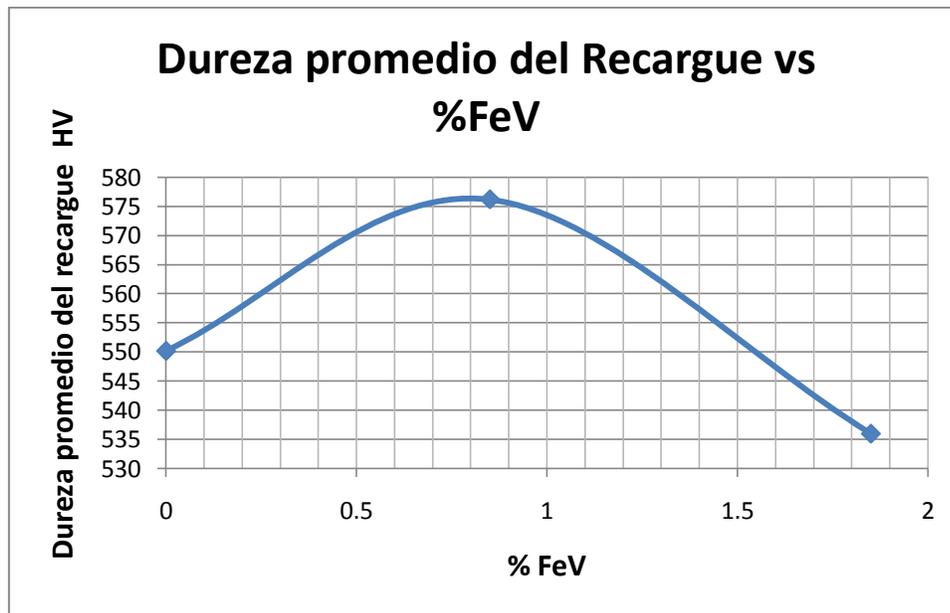


Figura 39. Dureza promedio vs. contenido de FeV.

Si bien los valores de dureza promedio son elevados, estos no son muy representativos pues están afectados por una dilución con el metal base y efectos de revenidos entre pases. El proceso de dilución varía la composición química y microestructura del recubrimiento, debido a esta variación de microestructura las propiedades mecánicas también varían. Por otro lado, los efectos de revenido reducen la dureza del recargue. Por esta razón, también se han tomado mediciones en la superficie de trabajo del recargue, ya que esta capa al estar alejada de la ZAC no está afectada al proceso de dilución y presenta zonas más representativas para evaluar una posible tendencia. Asimismo, la superficie del recargue es la zona que estará sometida al desgaste abrasivo por lo que es necesario evaluar esta zona.

En la Tabla 16 se puede apreciar que para la probeta V-0 se han tomado diferentes puntos sobre la superficie de la misma. Se obtuvo un valor promedio de dureza superficial de 686 HV sobre la superficie.

Tabla 16. Dureza promedio en la superficie de V-0.

Punto de Medición	HV	Dureza Promedio
1	696	686
2	673	
3	675	
4	604	
5	655	
6	762	
7	740	
8	679	

En la Tabla 17 de igual manera se tomaron diferentes puntos sobre la superficie de la probeta V-085 y se obtuvo el promedio de estos valores. La dureza promedio que se obtuvo fue de 728 HV.

Tabla 17. Dureza promedio en la superficie de V-085.

Punto de Medición	HV	Dureza Promedio
1	727	728
2	719	
3	778	
4	727	
5	735	
6	716	
7	696	

Finalmente en la Tabla 18 se puede apreciar el valor de dureza promedio en la superficie de la probeta V-185. Para este caso se obtuvo una dureza en la superficie de 683 HV.

Tabla 18. Dureza promedio en la superficie de V-185.

Punto de Medición	HV	Dureza Promedio
1	681	683
2	648	
3	677	
4	664	
5	683	
6	696	
7	731	

Al analizar las durezas de las superficies se puede notar que la probeta V-085 presenta una dureza de 728 HV siendo la probeta más dura de las tres analizadas. La probeta V-0 es la segunda probeta más dura de las analizadas con una dureza de 686 HV. Finalmente, la probeta V-185 presenta un valor de 683 HV en la superficie, siendo la probeta menos dura de las analizadas.

En la Figura 40 se puede apreciar la variación de la dureza superficial de los diferentes recargues estudiados con respecto a la composición química de los mismos. De manera similar a la dureza promedio de los recargues de la Figura 39 no existe una tendencia creciente o decreciente, sino que la conforme aumenta la composición química de FeV la dureza superficial aumenta hasta un valor de 728 HV para 0.85% de FeV y luego la dureza decrece conforme sigue aumentando el contenido de FeV. Si bien la curva obtenida para dureza promedio del recargue vs. composición química y la curva de dureza superficial del recargue vs. composición química guardan una misma tendencia, no implica que al obtener una de ellas la otra guarde necesariamente la misma tendencia.

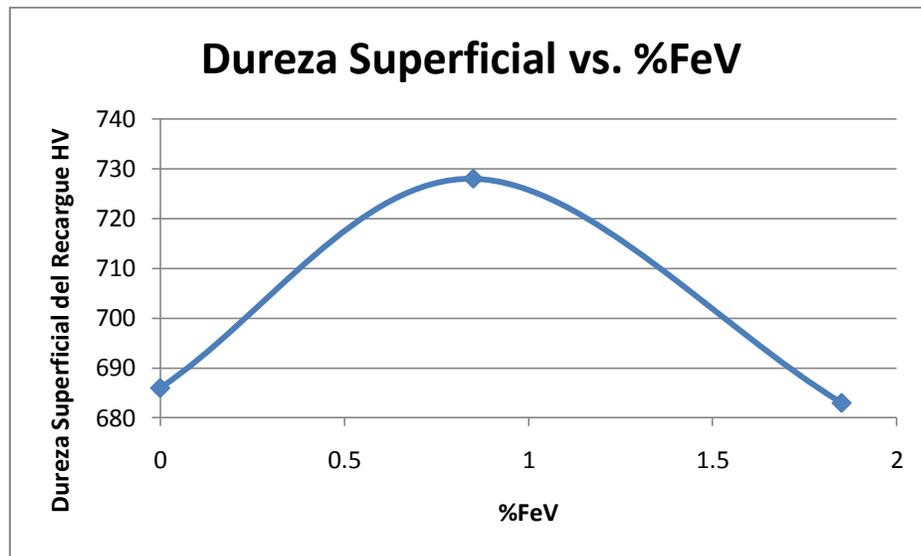


Figura 40. Dureza superficial del recargue vs. composición química.

Se puede observar una variación entre la dureza superficial de los recargues y la dureza promedio de las diferentes capas del recargue. La posible explicación a este hecho es que conforme se van depositando las capas, estas van reviniendo a la anterior, obteniéndose microestructuras de martensita revenida. Estas microestructuras poseen menor dureza que la martensita, por lo que la dureza promedio de las capas del recargue son menores que las durezas superficiales.

### 3.1.1.3. Ensayo de desgaste

Para los ensayos de desgaste los parámetros que se midieron fueron la masa inicial, masa final, tiempo de ensayo, velocidad de ensayo, diámetro de la rueda de caucho y la distancia recorrida por la huella.

La Tabla 19 muestra los datos tomados durante el ensayo de desgaste. Se puede observar que la variación de masa en gramos de las probetas V-185, V-085 y V-0 fueron 1.2006 gramos, 1.3101 gramos y 1.3471 gramos respectivamente.

Tabla 19. Resultados del ensayo de desgaste abrasivo – Procedimiento B

Probeta	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Velocidad RPM	Tiempo (min)	Dureza rueda promedio (Shore A)	Diámetro de la rueda (mm)	Delta masa (g)	Delta masa prom. (g)	Distancia recorrida (m)
V-185	A	168.2275	167.0269	219	10	60.0	226	1.2006	1555
	B	185.1194	183.9725	220	10	60.0	226	1.1469	1562
	C	216.1559	214.9016	219	10	60.0	226	1.2543	1555
V-085	A	154.3777	153.0847	220	10	60.0	225	1.2930	1555
	B	183.5457	182.2527	219	10	60.0	225	1.2930	1548
	C	210.3725	209.0281	218	10	60.0	226	1.3444	1548
V-0	A	188.9678	187.6207	218	10	60.0	226	1.3471	1548
	B	203.6434	202.2752	218	10	60.0	225	1.3682	1541
	C	230.5428	229.2168	219	10	60.5	226	1.3260	1555

Con los datos de Tabla 19 y considerando que la densidad del acero es  $7.8 \text{ mg/mm}^3$  [22], se puede estimar la pérdida de volumen de las probetas como se puede apreciar en la Tabla 20. Las variaciones de volumen para las probetas V-185, V-085 y V-0 son  $154 \text{ mm}^3$ ,  $168 \text{ mm}^3$  y  $173 \text{ mm}^3$  respectivamente. Debido a que la variación de volumen excede a los  $100 \text{ mm}^3$  se empleó el procedimiento B de la norma ASTM G65-04 (2010).

Tabla 20. Variación de volumen de las probetas.

Probeta	Delta masa (g)	Delta volumen ( $\text{mm}^3$ )	Delta promedio volumen ( $\text{mm}^3$ )
V-185	A	1.2006	154
	B	1.1469	147
	C	1.2543	161
V-085	A	1.293	166
	B	1.293	166
	C	1.3444	172
V-0	A	1.3471	173
	B	1.3682	175
	C	1.326	170

En la Figura 41 se puede apreciar que conforme aumenta el contenido de FeV en el revestimiento del electrodo, la pérdida de masa disminuye, por lo que la resistencia al desgaste que presenta el recargue duro aumenta.

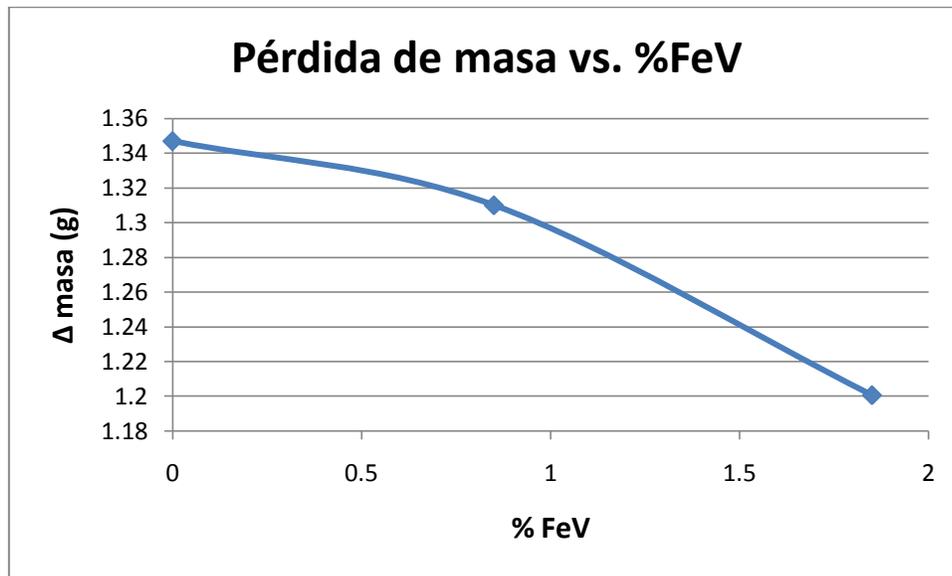


Figura 41. Pérdida de masa vs. contenido de FeV

En la Figura 42 se aprecia la relación entre la pérdida de masa de los recubrimientos y su dureza. Se puede apreciar que no existe una relación creciente o decreciente entre la dureza y la resistencia al desgaste (pérdida de masa).

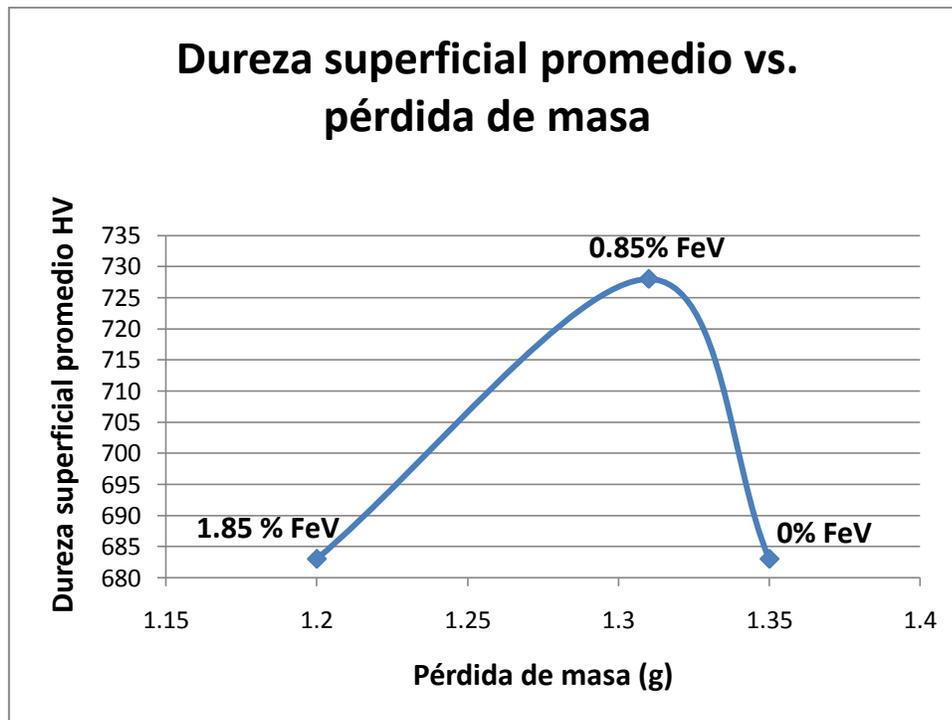


Figura 42. Dureza superficial promedio vs. pérdida de masa.

#### 3.1.1.4. Metalografía

A continuación se muestra la metalografía obtenida de las diferentes muestras.

##### 3.1.1.4.1. Probeta V-185 – 1.85% FeV

Esta probeta se atacó con Nital y Cloruro Férrico por partes para poder determinar con mayor facilidad las fases de una misma muestra. Se hizo un barrido metalográfico desde el metal base hasta el metal de hardfacing, pasando por la línea de fusión y la ZAC.

Se puede apreciar en la Figura 43 granos equiaxiales de ferrita y granos alargados de perlita en la zona del metal base a 500 aumentos.

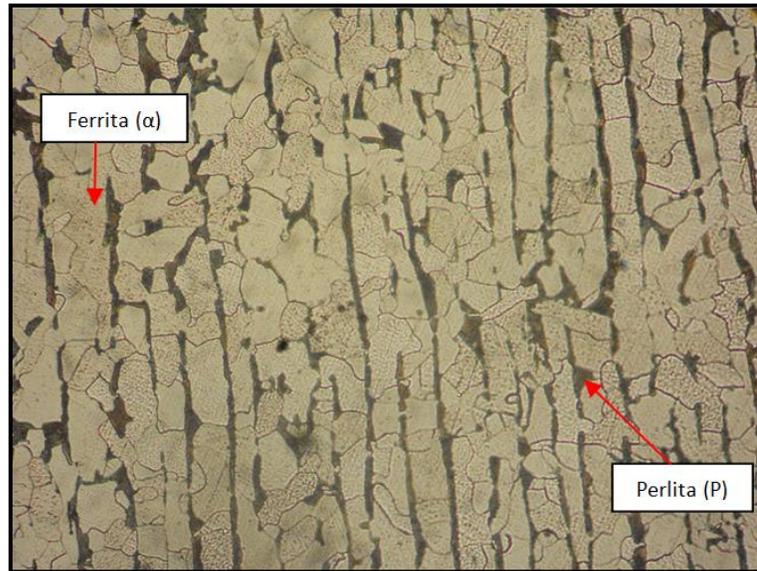


Figura 43. V-185 – Metalografía metal base a 500x.

Para realizar el barrido metalográfico se tomaron 10 puntos en una sección de la probeta V-185 como la que se muestra en la Figura 44.

La Tabla 21 está relacionada con la Figura 44. En esta tabla se puede apreciar qué figura corresponde a los puntos en mención.

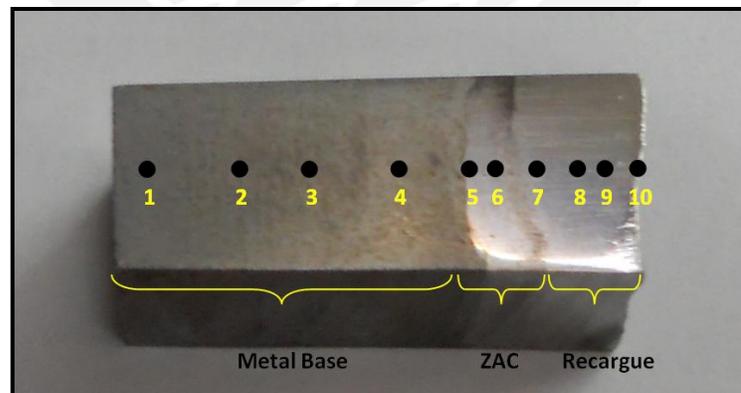


Figura 44. V-185 Puntos de toma de metalografías.

Tabla 21. Relación de punto de barrido metalográfico con figuras.

Punto 1	Figura 45A
Punto 2	Figura 45B
Punto 3	Figura 45C
Punto 4	Figura 45D
Punto 5	Figura 46A
Punto 6	Figura 46B
Punto 7	Figura 46C
Punto 8	Figura 46D
Punto 9	Figura 47A
Punto 10	Figura 47B

La Figura 45 presenta 4 metalografías del metal base: A, B, C y D. Las fotografías fueron tomadas acercándose a la línea de fusión, la Figura 45A fue tomada en el extremo más alejado de la línea de fusión y la Figura 45D fue tomada en una zona más cercana a la línea de fusión.

La Figura 45A muestra granos equiaxiales de ferrita (zona clara) y granos alargados de perlita (zona parda) a 1000X. Conforme se van tomando imágenes acercándose a línea de fusión, los granos de perlita se van estirando y empiezan a fragmentarse ligeramente, como se aprecia en la Figura 45B. Acercándose un poco más a la línea de fusión se puede observar un ligero afinamiento de la ferrita y una mayor fragmentación de la perlita como se observa en la Figura 45C. Finalmente, se puede apreciar en la Figura 45D una región cercana a la ZAC que presenta un afino mayor de granos de ferrita y de granos de perlita.

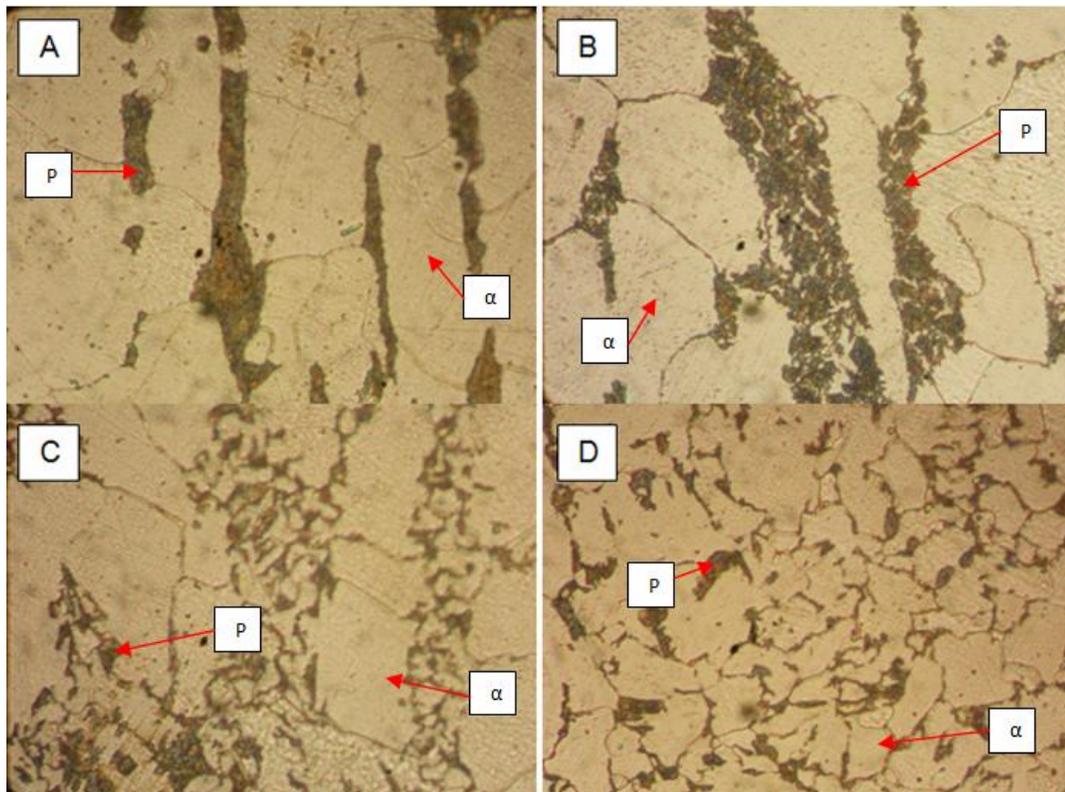


Figura 45. V-185 Metalografía metal base a 1000x.

Continuando el barrido metalográfico, en la Figura 46A se puede apreciar la interfase ZAC-Hardfacing. La ZAC muestra granos finos de ferrita perlita y el metal de recargue presenta una fase que aparenta ser martensita revenida. En la Figura 46B empieza a verse una matriz de austenita retenida (zona clara) con colonias de martensita de apariencia acicular. En la Figura 46C se puede ver que la forma acicular de la martensita disminuye ante un probable revenido de la martensita debido los diferentes calentamientos que se generan al soldar las 3 capas del recargue. Aun se puede apreciar la matriz de austenita retenida con colonias de martensita que empiezan a revenirse. En la Figura 46D se puede observar la matriz de austenita retenida con colonias que parecen ser de martensita revenida, aunque también podrían ser colonias de carburos que han empezado a formarse.

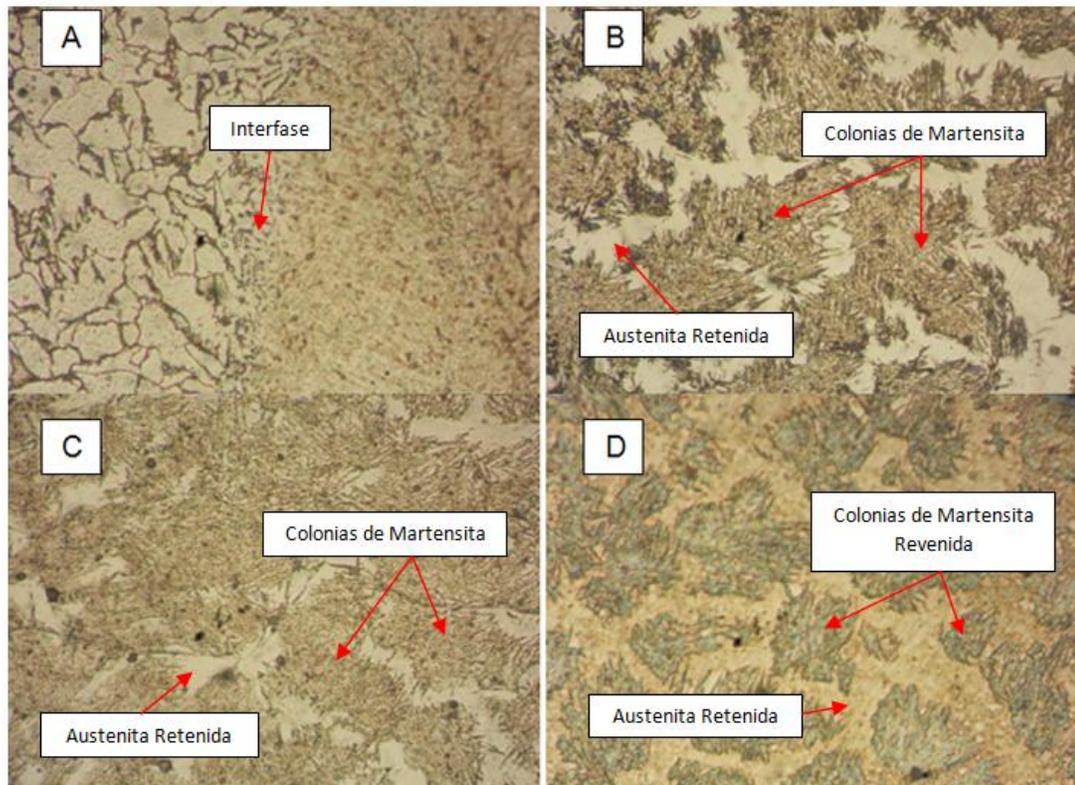


Figura 46. V-185 Metalografía ZAC y recargue duro a 1000x.

En la Figura 47A se puede notar que al acercarse al extremo del recargue duro, las colonias de martensita vuelven a aparecer tomando cierta forma acicular. Finalmente, en la Figura 47B se puede ver la forma acicular de la martensita vuelve aparecer en forma de colonias en la matriz austenítica.

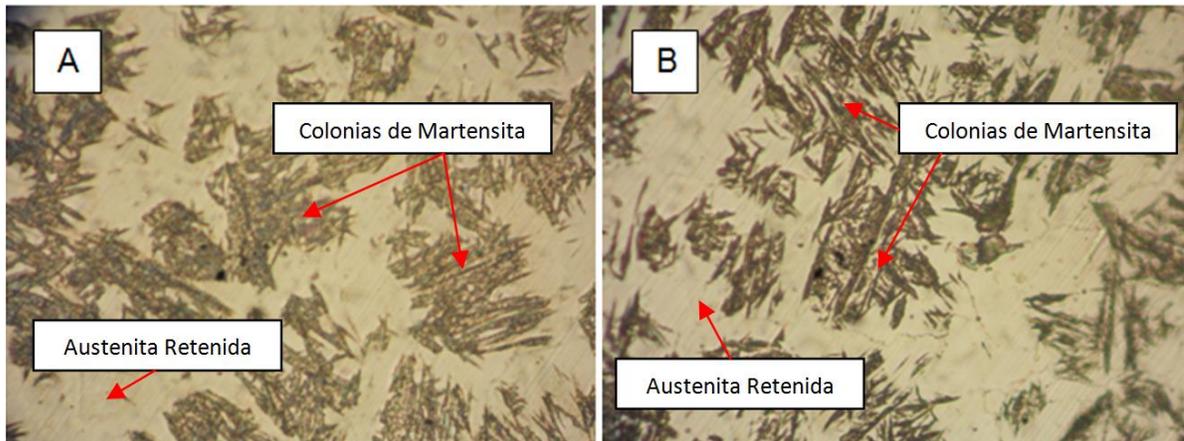


Figura 47. V-185 Metalografía recargue duro a 1000x.

#### 3.1.1.4.2. Probeta V-085 – 0.85% FeV

Esta probeta se atacó con el reactivo Beraha obteniéndose una microestructura coloreada como se aprecia en las distintas imágenes de la Figura 48. Este reactivo tiene la peculiaridad de poder revelar la ferrita, perlita, martensita y bainita.

Esta probeta fue atacada con un reactivo diferente a la probeta V-185 con la intención de poder revelar carburos, no obstante no se encontraron. Si bien es cierto que esta probeta se atacó con un reactivo distinto, la microestructura encontrada fue muy similar a la V-185.

De manera similar a la probeta anterior, el barrido metalográfico se hizo empezando desde el metal base, siguiendo por la ZAC y finalizando por el recargue duro.

En la Figura 48A se puede apreciar granos equiaxiales de ferrita y perlita. Ambas microestructuras se encuentran coloreadas. Con el reactivo Beraha la perlita se torna de color pardo y la ferrita se torna de colores claros.

En la Figura 48b se puede observar la interfase formada por dos tipos de martensita una de color pardo oscuro que aparenta empezar a reventarse y corresponde a la zona del recargue; y otra de morfología acicular que corresponde a la zona del metal base.

La Figura 48C es una zona del recargue cercana a la zona de interfase. En ella se puede apreciar una matriz de color blanca que aparenta ser austenita retenida con colonias de martensita de color oscuro.

Las Figura 48D y E, muestran lo que aparenta ser una matriz de austenita retenida con colonias de martensita color pardo que se han revenido. Se puede apreciar que en la Figura 48E las colonias de martensita revenida han empezado a redondearse ligeramente.

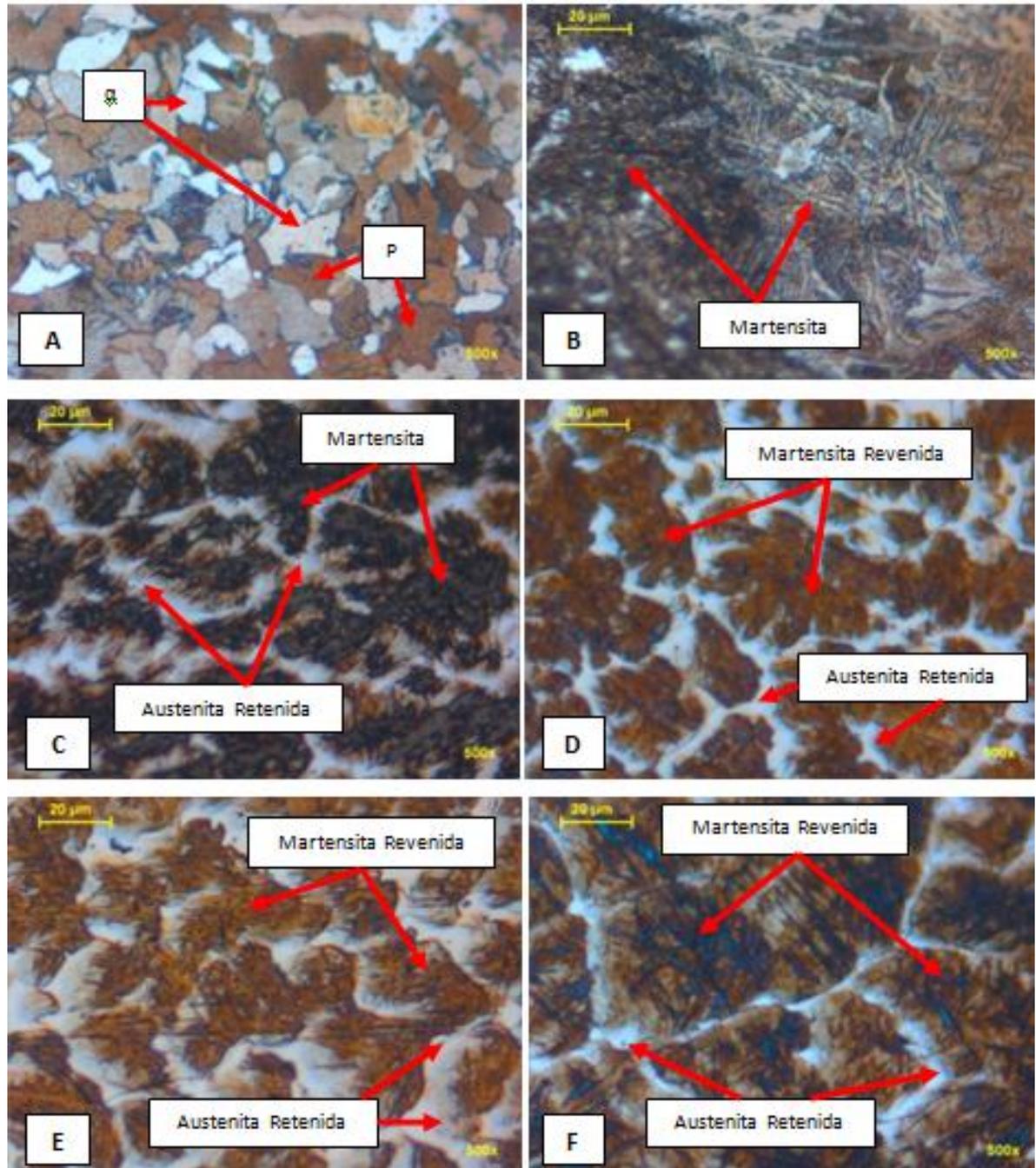


Figura 48. V-085 Metalografía recargue duro a 500x.

Finalmente en la Figura 48F se puede apreciar la microestructura de la superficie del recargue donde se observan colonias de martensita de un color pardo revenido en una matriz de austenita retenida.

#### 3.1.1.4.3. Probeta V-0 – 0% FeV

Esta probeta fue atacada también con el reactivo Beraha obteniéndose una microestructura coloreada como se aprecia en las distintas imágenes de la Figura 49.

En la Figura 49A se puede observar el metal base. La microestructura está formada por granos de ferrita y perlita.

La Figura 49B es la zona de la línea de fusión. En ella se puede apreciar una zona que es netamente martensita de color marrón oscuro junto a una zona donde se puede apreciar granos equiaxiales finos de perlita y ferrita.

La Figura 49C es la zona que corresponde a la primera capa de recargue. En ella se puede apreciar la ligera aparición de austenita retenida con zonas de lo que aparenta ser martensita revenida de color marrón oscuro.

En Figura 49D y E, se pueden apreciar colonias de martensita de apariencia acicular de color marrón oscuro en un matriz de austenita retenida. Estas microestructuras están situadas en la zona que corresponde a la segunda capa del recargue.

En la Figura 49F, la superficie del recargue, se puede apreciar lo que aparenta ser una matriz de austenita retenida con colonias de martensita revenida de color amarillo-pardo.

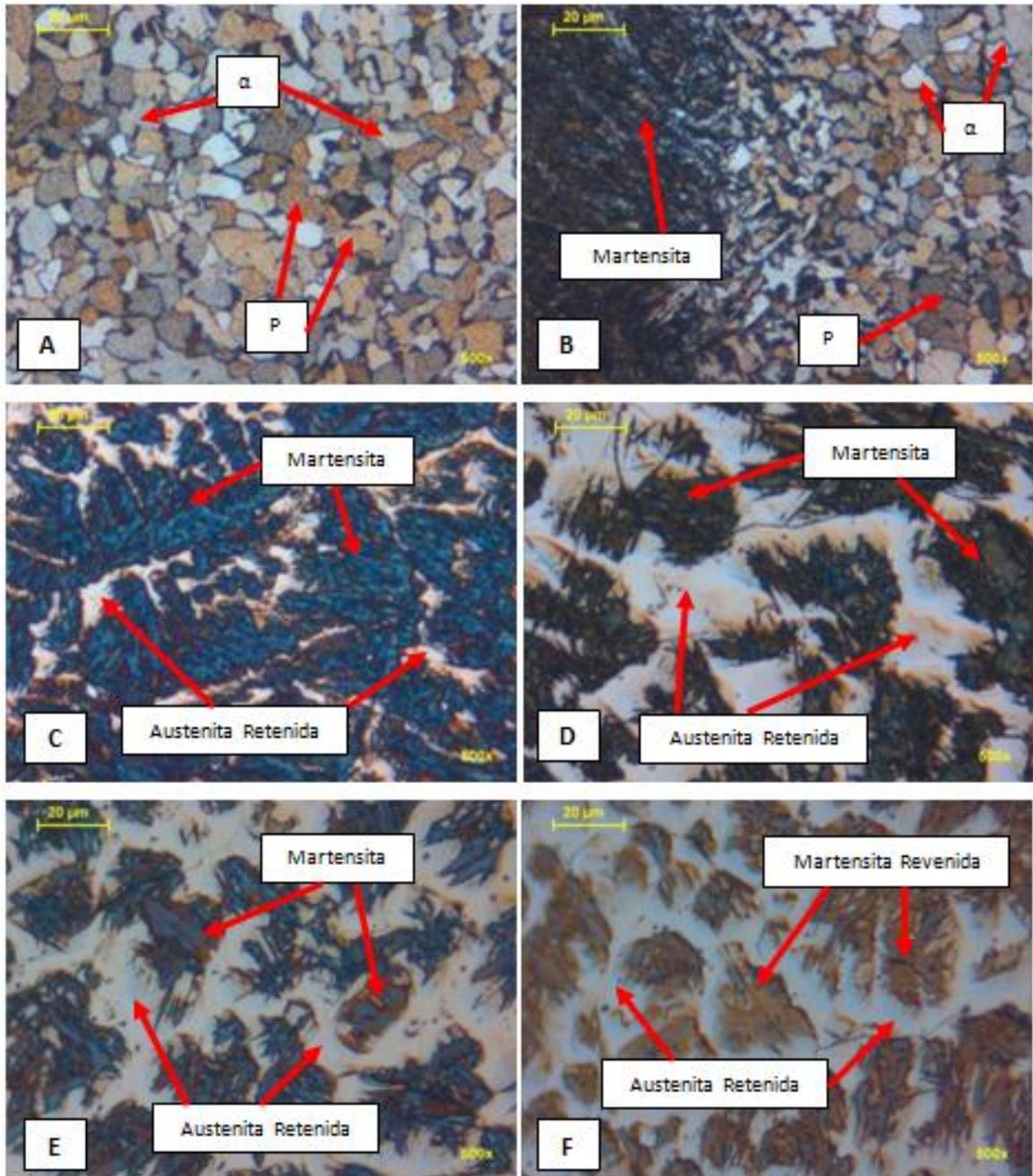


Figura 49. V-0 Metalografía recargue duro a 500x.

### 3.1.2. Discusión

Luego de analizar los resultados de las tres probetas no se encontró una tendencia creciente conjunta de resistencia al desgaste abrasivo y dureza, con respecto a la composición química. Por un lado se encontró una curva de dureza superficial vs. composición química que presenta un máximo de dureza para la probeta V-085 (0.85% de FeV); y por otro lado se encontró una curva de pérdida de masa vs. composición química que sí presenta una tendencia decreciente, con una pérdida de masa mínima de 1.2006 gramos para la probeta V-185 (1.85% de FeV), lo que significa una máxima resistencia al desgaste abrasivo.

La dureza superficial máxima fue de 728 HV para la muestra V-085. Las durezas superficiales de las muestras V-0 y V-185 fueron muy similares: 686 HV y 683 HV respectivamente. Esto quiere decir que para una probeta con una composición química de FeV de 0.85% la dureza obtenida se incrementa 6.1% aproximadamente con respecto a una probeta que posee 0% FeV. Y además, que el incremento del contenido de FeV no implica un incremento de la dureza superficial.

Las microestructuras encontradas en los tres casos fueron similares, encontrándose una matriz de austenita retenida con colonias de lo que aparenta ser martensita revenida. La matriz austenítica le brinda tenacidad al recargue, por lo que se puede predecir que los recargues tendrán buena resistencia al impacto. Por otro lado las colonias de martensita revenida le brindan propiedades de elevada dureza a los recargues estudiados.

De las tres probetas analizadas se recomienda emplear la probeta V-185, con 1.85% de FeV pues es la probeta que presenta la mejor resistencia al desgaste. Esta probeta es 9.12% más resistente al desgaste que la probeta V-085, y 12.20% más resistente que la probeta V-0. Si bien es cierto no es la probeta más dura, lo que esta tesis busca es recomendar la probeta que resista mejor a la abrasión. No obstante, esta información debe ser tomada con cuidado, pues solo se han analizado 3 composiciones químicas diferentes. Se debe hacer un análisis más extenso con la información obtenida de los resultados completos del proyecto global de la empresa SOLDEXA S.A. para encontrar posibles tendencias.

### 3.2. CONCLUSIONES

- El electrodo con 1.85% de FeV es el que posee la mayor resistencia al desgaste. Para un ensayo de desgaste usando el Procedimiento B de la norma ASTM-G65 la variación de masa promedio es de 1.2006 gramos aproximadamente.
- El electrodo con 0.85% de FeV posee la mayor dureza tanto superficial de recargue, con un valor de 728HV; como promedio en las distintas capas de recargue, con un valor 576.2 HV.
- Al no haber un solo electrodo que tenga la mejor dureza y la mejor resistencia al desgaste al mismo tiempo, se debe elegir el electrodo que presenta la mejor resistencia al desgaste pues esta tesis busca electrodos que minimicen el efecto de desgaste abrasivo. El electrodo recomendado dentro de los tres electrodos estudiados es el que contiene 1.85% de FeV. No obstante, debe analizarse toda la información del proyecto global de la empresa SOLDEXA S.A. para tener una tendencia más confiable.
- Las microestructuras encontradas fueron similares para todos los casos. El metal base presenta granos de ferrita y perlita. La ZAC presenta granos de ferrita y perlita fragmentada. Finalmente el recargue presenta una matriz de austenita retenida con colonias de lo que aparenta ser martensita revenida. Esta última microestructura es la explicación de la elevada dureza de los recargues.

- Con porcentajes bajos de FeV en el revestimiento de los electrodos se obtienen valores de dureza similares a los obtenidos por investigaciones con porcentajes altos. Esto es importante pues la fabricación de electrodos de bajo porcentaje de FeV es más económica que la de los electrodos que presentan elevados porcentajes de FeV.
- No se logró encontrar carburos en las microestructuras analizadas. Esto podría ser debido a que los porcentajes de FeV que utilizaron para la fabricación de los electrodos eran muy bajos.
- Es recomendable realizar un ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y un ensayo de Difracción de rayos X (DRX) para analizar en mayor detalle las microestructuras que se obtienen en los recargues.

## Bibliografía

- [1] ASM - American Society for Materials. (1992). *ASM Handbook Vol. 18 - Friction, Lubrication, and Wear Technology*.
- [2] Dumovic, M. (2002). *Repair and Maintenance Procedures for Heavy Machinery Components*. 50th WTIA Annual Conference held in Sidney, Australia.
- [3] Pérez, G., Gonzáles, H., & Toro, A. (2009). Desgaste abrasivo de cuchillas de arado rotativo en el suelo franco arenoso. 162.
- [4] El Banco Mundial. (2012). *PIB (US\$ a precios actuales)*. Retrieved from <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD/countries/1W?display=graph>
- [5] Avner, S. (1987). *Introducción a la Metalurgia Física* (2 ed.). México D.F.: Calypso.
- [6] Sakihama Uehara, J. L. (2006). *Estudio de la resistencia a la abrasión de bajo esfuerzo según ASTM G65 de tres recubrimientos duros aplicados mediante soldadura*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [7] Surface Engineering Alloy Company. (n.d.). Retrieved Agosto 7, 2012, from <http://www.surfaceengineering.com/>
- [8] Lipson, C. (1970). *Importancia del desgaste en el diseño*. New Jersey: Prentice Hall.
- [9] Norman, T. E. *Abrasive Wear of Metals, Engineering Approach to Surface Damage*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- [10] Horwitz, H. (1989). *Soldadura: Aplicaciones y Práctica*. México D.F.: Alfaomega.
- [11] Lincoln Electric. (n.d.). Selection Guide to Lincoln Hardfacing Materials & Procedures.
- [12] Lean, P. *Tratamientos Térmicos. Apuntes de Clase*.
- [13] Fosca, C. (2007). *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura* (7 ed.). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [14] *Time-Temperature-Transformation (TTT) Diagram*. (2011). Retrieved from <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/ttttdiagram.html>
- [15] EXSA S.A. *Manual de Soldadura Soldexa y Catálogo de Productos*.
- [16] *Tata Steel*. (2011). Retrieved from [http://www.tatasteeleurope.com/file\\_source/Images/Functions/Education/PictureGallery/SteelMicrostructureCementite.jpg](http://www.tatasteeleurope.com/file_source/Images/Functions/Education/PictureGallery/SteelMicrostructureCementite.jpg)

- [17] Xing Hong, W., Fang, H., Shi Yaq, Q., & Zeng Da, Z. (2008). Microstructure of the Fe-based hardfacing layers reinforced by TiC-VC-Mo<sub>2</sub>C particles. *Surface and Coatings Technology* 202 , 1502-1509.
- [18] ASTM. (2010). *Standard Test Measuring Abrasion Using the Dry Sand / Rubber Wheel Apparatus / G65-04*.
- [19] Erni Montes, J. A. (2004). *Diseño, fabricación y puesta en marcha de una máquina de ensayos de desgaste abrasivo de bajo esfuerzo, según norma ASTM G-65*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [20] ASTM. (2011). *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials / E384-11*.
- [21] ASM - American Society for Materials. (1998). *ASM Handbook vol 9 - Metallography and Microstructure*.
- [22] ASM - American Society for Materials. *ASM Handbook vol. 1 - Properties and selection steel*.
- [23] Hernández, G. (2008). *Manual del Soldador* (19 ed.). Madrid: CESOL.
- [24] Callister, W. (2010). *Materials Science and Engineering an Introduction* (8 ed.). Estados Unidos: World Color USA.
- [25] Katsich, C., & Badisch, E. (2011). Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions. *Surface and Coatings Technology* .
- [26] KIRCHGABNER, M., BADISCH, E., & FRANEK, F. (2008). Behavior of Iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear* , 772-779.
- [27] Sundstrom, A., Rendon, J., & Olsson, M. (2001). Wear behavior of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions. *Wear* 250 , 744-754.
- [28] Hawk, J., Wilson, R., Tylczak, J., & Dogan, O. (199). Laboratory abrasive wear tests: Investigation of test methods and alloy Correlation. *Wear* , 1031-1042.
- [29] Metal Fab. (2011). *Tarco Steel*. Retrieved from [http://www.tarcosteel.com/mf\\_welding.php](http://www.tarcosteel.com/mf_welding.php)