

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



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**Resistencia al desgaste abrasivo de recargues duros  
fabricados con electrodos con 5% de FeTi  
y contenido variable de FeV**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO MECANICO**, que presenta el bachiller:

**Ainsworth Noriega Ríos**

**ASESOR: Dr. Francisco Aurelio Rumiche Zapata  
Ing. José Hideki Sakihama Uehara**

Lima, setiembre de 2013

## **RESUMEN:**

Se define al desgaste como la pérdida progresiva de material sólido de la superficie de un determinado componente, el desgaste en operación es uno de los problemas que originan mayores pérdidas económicas; esto ha conllevado a que diferentes rubros de la industria busquen opciones viables y de bajo costo en el mantenimiento de componentes mecánicos.

Uno de los métodos más utilizados para mitigar los efectos del desgaste es mediante la aplicación de recubrimientos duros de soldadura denominado “*HARDFACING*”; sin embargo, se necesitan ciertos insumos como el Ferro-Titanio, Ferro-Vanadio, Grafito, entre otros para generar microestructuras duras y resistentes al desgaste. Estos insumos utilizados en la fabricación de electrodos de recargue evidencian un incremento en su costo lo cual conllevaría al encarecimiento de este método de protección.

En el presente tema de tesis, se ha evaluado el desempeño de depósitos de *hardfacing* fabricados empleando un conjunto de nuevos electrodos propuestos por una compañía de consumibles local. En particular se busca evaluar el efecto del contenido de Ferro-Vanadio (2.85%, 3.85% y 5.85%) en el revestimiento de electrodos con un porcentaje de 5% de Ferro-Titanio y libres de grafito, sobre la microestructura, dureza y resistencia al desgaste abrasivo de depósitos obtenidos mediante proceso SMAW sobre planchas de acero ASTM A-36, finalmente se determinó cuál de los electrodos proporciona un recargue con mayor resistencia al desgaste.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

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

TÍTULO	: Resistencia al desgaste abrasivo de recargues duros fabricados con electrodos con 5% de FeTi y contenido variable de FeV.
ÁREA	: Materiales.
PROPUESTO POR	: Ing. Ronald Requejo Villanueva.
ASESORES	: Dr. Francisco Aurelio Rumiche Zapata. Ing. José Luis Hideki Sakihama Uehara.
TESISTA	: Ainsworth Noriega Ríos.
CÓDIGO	: 2007.2144
FECHA	: 10 de setiembre del 2013

### DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Dentro de los diferentes problemas que se pueden encontrar en la industria, el desgaste de una pieza en operación es uno de los que originan mayores pérdidas económicas; esto ha conllevado a que diferentes rubros de la industria busquen opciones viables y de bajo costo en el mantenimiento de componentes mecánicos.

Uno de los métodos más utilizados para mitigar los efectos del desgaste es mediante la aplicación de recubrimientos duros de soldadura denominado "*HARDFACING*"; sin embargo, se necesitan ciertos insumos como el Ferro-Titanio, Ferro-Vanadio, Grafito, entre otros para generar microestructuras duras y resistentes al desgaste. Estos insumos utilizados en la fabricación de electrodos de recargue evidencian un incremento en su costo lo cual conllevaría al encarecimiento de este método de protección.

En este contexto, en el presente tema de tesis, se ha evaluado el desempeño de depósitos de *hardfacing* fabricados empleando un conjunto de nuevos electrodos propuestos por una compañía de consumibles local. En particular se busca evaluar el efecto del contenido de Ferro-Vanadio (2.85%, 3.85% y 5.85%) en el revestimiento de electrodos con un porcentaje de 5% de Ferro-Titanio y libres de grafito, sobre la microestructura, dureza y resistencia al desgaste abrasivo de depósitos obtenidos mediante proceso SMAW sobre planchas de acero ASTM A-36, finalmente se determinó cuál de los electrodos proporciona un recargue con mayor resistencia al desgaste.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO****RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE RECARGUES DUROS FABRICADOS  
CON ELECTRODOS CON 5% DE FeTi Y CONTENIDO VARIABLE DE FeV**

## Introducción

1. MARCO TEORÍCO
  - 1.1 Desgaste.
  - 1.2 Factores que afectan el desgaste.
  - 1.3 Recubrimientos protectores-Harfacing.
  - 1.4 Ensayo de desgaste.
  - 1.5 Microestructuras resistentes al desgaste.
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.
  - 2.1 Ensayos de caracterización.
  - 2.2 Ensayo de desgaste.
3. RESULTADOS Y DISCUSION.

## CONCLUSIONES.

## Bibliografía

---

Dr. Francisco Remiche Zapata

Asesor

---

Ing. Jose Sakihama Uehara

Asesor



*Dedico este trabajo a mis padres Glacy y Robespierre, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien. A mis hermanos Duffet, Zezetti y Guilder por ser tan buenos hermanos y transmitirme sus experiencias de vidas. Finalmente se lo dedico a mi Adi, por haberse convertido en una motivación especial para mi vida.*

## AGRADECIMIENTOS

*La presente Tesis es fruto del apoyo directo e indirecto de muchas personas. Agradezco el apoyo incondicional de mis padres, a todos los profesores que me ayudaron a en mi formación profesional.*

*A mis asesores de tesis el Dr. Francisco Rumiche y al Ing. Jose Sakihama por los consejos, apoyo, ánimo brindado y sobre todo por su paciencia ante mi inconsistencia; les agradezco sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis y sus atinadas correcciones.*

*Al Dr. Julio Acosta por ser el primero que confió en mí e invitarme a apoyar en un proyecto del área de materiales. Al profesor Roberto Lazarte y al profesor Sócrates Cutipa. Al Dr. Paul Lean por confiar en que podía continuar creciendo profesionalmente y que me sirvió como motivación adicional para culminar esta tesis.*

*A mis compañeros y amigos que trabajan en el laboratorio de materiales y de la oficina de INGESOLD por su apoyo y muestras de confianza: Natalia, Cinthya, Elvira, Rosario, Aníbal, Raúl, Daniel, Ronald, Víctor, Wilber, Jorge, Paulo, Carlos, Santos, Rósel, Miguel.*

*Agradecimiento a la Empresa SOLDEXA S.A y al LABORATORIO DE MATERIALES DE LA PUCP.*

*Gracias a todos*

## INDICE

Introducción.....	3
CAPÍTULO 1 .....	5
1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 <i>DESGASTE:</i> .....	6
1.1.1 Desgaste abrasivo: .....	7
1.1.2 Desgaste por Impacto: .....	9
1.1.3 Desgaste por fatiga: .....	11
1.1.4 Desgaste Erosivo: .....	12
1.1.5 Desgaste por cavitación: .....	13
1.1.6 Desgaste adhesivo:.....	14
1.2 <i>FACTORES QUE AFECTAN EL DESGASTE:</i> .....	15
1.2.1 Dureza: .....	15
1.2.2 Acabado Superficial: .....	18
1.2.3 Velocidad: .....	18
1.2.4 Partículas Abrasivas: .....	19
1.2.5 Carga: .....	19
1.3 <i>RECUBRIMIENTOS PROTECTORES-HARDFACING:</i> .....	21
1.3.1 Principales elementos que componen un recubrimiento protector:.....	23
1.4 <i>ENSAYO DE DESGASTE:</i> .....	24
1.5 <i>MICROESTRUCTURAS RESISTENTES AL DESGASTE:</i> .....	26
1.5.1 Denominación de recubrimientos duros y microestructuras características: 29	
1.5.2 Características específicas de algunos elementos de aleación: .....	35

CAPÍTULO 2 .....	43
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	43
2.1 <i>Ensayos de Caracterización:</i> .....	47
2.1.1 Análisis químico (A.Q.):.....	47
2.1.2 Procedimiento para el Análisis Metalográfico: .....	48
2.1.3 Ensayos de Dureza:.....	49
2.2 <i>Ensayos de Desgaste:</i> .....	50
CAPÍTULO 3 .....	55
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
CAPÍTULO 4 .....	85
4. CONCLUSIONES.....	85
Bibliografía .....	87

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema de desgaste abrasivo .....	7
Figura 1-2a: Abrasión de bajos esfuerzos .....	8
Figura 1-2b: Abrasión de altos esfuerzos .....	8
Figura 1-2c: Abrasión penetrante .....	8
Figura 1-3: Mapa esquemático de las zonas apreciables en una superficie sometida a impacto .....	10
Figura 1-4a: Matriz deformable .....	10
Figura 1-4b: Matriz quebradiza .....	10
Figura 1-5: Esquema de desgaste por Fatiga .....	11
Figura 1-6: Esquema de desgaste erosivo .....	12
Figura 1-7: Esquema del desgaste por cavitación .....	13
Figura 1-8: Esquema de desgaste por Fricción .....	14
Figura 1-9: Relación Dureza vs. % grafito y Volumen desgastado vs. % grafito .....	16
Figura 1-10: Tasa de desgaste vs (H/Ha) .....	16
Figura 1-11: Relación entre el mecanismo y coeficiente de desgaste .....	17
Figura 1-12: Efecto de las rugosidades en el desgaste .....	18
Figura 1-13: Tasa de desgaste vs. Velocidad de deslizamiento .....	19
Figura 1-14: Formas probables de partículas abrasivas .....	20
Figura 1-15: Efectos de la carga en la tasa de desgaste .....	20
Figura 1-16: Componente mecánico con aplicación de recubrimiento protector .....	22
Figura 1-17: Esquema de máquina según norma ASTM G 65 .....	24
Figura 1-18: Representación esquemática de las diferentes microestructuras eutécticas .....	27
Figura 1-19: Efecto de la microestructura y la dureza en la resistencia al desgaste abrasivo .....	28
Figura 1-20: Comportamiento de recubrimientos en base Fe ante un mecanismo de desgaste según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes .....	29

Figura 1-21: Microestructuras de recubrimientos en base Fe según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes .....	31
Figura 1-22: Microestructura Fe-FS .....	33
Figura 1-23: Microestructura Fe-M2 .....	33
Figura 1-24: Microestructura Fe-M2 .....	34
Figura 1-25: Microestructura Fe-PKE .....	34
Figura 1-26: Comportamiento de los elementos de aleación más utilizados .....	35
Figura 1-27: Fe-Mo vs. Fracción de volumen de carburos y Fe-Mo vs. Dureza .....	36
Figura 1-28: Volumen desgastado vs Distancia de deslizamiento .....	37
Figura 1-29: Relación que existe entre la dureza y el contenido de FeTi y FeV.....	38
Figura 1-30: Dureza según el número de capas depositadas .....	39
Figura 1-31: Dureza vs Volumen perdido en un ensayo de desgaste multidireccional (“pin on drum”) .....	41
Figura 1-2a: Dureza vs Volumen perdido según ensayo ASTM G65.....	42
Figura 1-2b: Formación de “labios” y deformaciones progresivas que se desprenden del material .....	42
Figura 2-1: Esquema del procedimiento experimental .....	45
Figura 2-2: Dimensiones aproximadas de las probetas a ensayar .....	47
Figura 2-3: Equipos para la preparación y análisis metalográfico .....	48
Figura 2-4: Durómetro Vickers y huella dejada por el indentador .....	49
Figura 2-5: Esquema de barrido de dureza .....	49
Figura 2-6: Partes del sistema tribológico: rueda, abrasivo y muestra.....	51
Figura 2-7: Toma de dureza Shore A del caucho de la rueda .....	51
Figura 2-8: Medición del diámetro de la rueda .....	52
Figura 2-9: Cupones sometidos a una limpieza por ultrasonido en un baño de acetona .....	53
Figura 3-1: Barrido de Dureza de las tres zonas para cada serie: Metal Base, Zona de Dilución, Zona de Recargue .....	58
Figura 3-2: Representación de los valores de dureza de cada serie .....	60
Figura 3-3: Relación del contenido de FeV(%) del revestimiento del electrodo con el contenido de V(%) en el depósito de recargue .....	61
Figura 3-4: Posibles microestructuras según composición química .....	62

Figura 3-5: Muestras del material base para metalografía.....	63
Figura 3-6: Metalografía del material base .....	63
Figura 3-7: Identificación de las capas de recargue y las zonas afectadas por el calor .....	64
Figura 3-8: Esquema de barrido metalográfico de serie de cupones 285 .....	65
Figura 3-9: Barrido metalográfico de serie 285 .....	65
Figura 3-10: Metalografía a 1000x del punto “a” de la Figura 3-8 .....	66
Figura 3-11: Metalografía a 1000x del punto “b” de la Figura 3-8 .....	68
Figura 3-12: Metalografía a 1000x de punto “c” de la Figura 3-8 .....	68
Figura 3-13: Metalografía a 1000x del punto “d” de la Figura 3-8 .....	69
Figura 3-14: Metalografía a 1000x del punto “e” de la Figura 3-8 .....	70
Figura 3-15: Metalografía a 1000x del punto “f” de la Figura 3-8 .....	71
Figura 3-16: Metalografía a 1000x del punto “g” de la Figura 3-8 .....	71
Figura 3-17: Metalografía a 1000x del punto “h” de la Figura 3-8 .....	72
Figura 3-18: Barrido metalográfico de serie de cupones 283.....	73
Figura 3-19a: Microestructura a 1000x de la superficie de la serie 385 .....	74
Figura 3-19b: Microestructura a 1000x de las zonas continuas a la Figura 3-14a .....	74
Figura 3-20: Barrido metalográfico de serie de cupones 284.....	75
Figura 3-21a: Microestructura a 1000x de la superficie de la serie 585 .....	76
Figura 3-21b: Microestructura a 1000x de las zonas continuas a la Figura 3-21a .....	76
Figura 3-22a: Metalografías a 500x (izquierda) -- Metalografías a 1000x (derecha) de cada serie analizada.....	77
Figura 3-23: Pérdida de masa vs. Dureza Promedio .....	79
Figura 3-24: Relación de Dureza y Pérdida de masa según el contenido de FeV en el electrodo de recubrimiento .....	81
Figura 3-25: Relación de volumen desgastado vs. Contenido de FeV .....	83
Figura 3-26: Relación de volumen desgastado ( $\text{mm}^3$ ) vs. Dureza del recargue HV .....	83
Figura 3-27: Relación de volumen desgastado ( $\text{mm}^3$ ) vs. Dureza del recargue HV según la literatura .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Precio de minerales usados en recubrimientos protectores ..... desde 2007-2011 .....	24
Tabla 1-2: Designación de recubrimientos según su microestructura .....	31
Tabla 1-3: Relación del tamaño de las partículas de TiC con el tamaño de grano ...	40
Tabla 1-4: Relación de dureza con el ancho de huella al rayado .....	40
Tabla 2-1: Composición variables a evaluar en el revestimiento de los electrodos...	45
Tabla 2-2: Parámetros de soldeo .....	46
Tabla 2-3: Parámetro de ensayo de desgaste abrasivo .....	50
Tabla 2-4: Hoja de registro de datos del ensayo de desgaste .....	54
Tabla 3-1: Resultados del ensayo de desgaste .....	56
Tabla 3-2: Barrido de dureza .....	57
Tabla 3-3: Dureza Superficial de los depósitos de recargue.....	59
Tabla 3-4: Composición química de los recargues de soldadura.....	61
Tabla 3-5: Cotenido de carbono y elementos aleantes de los ..... depósitos de recargue.....	62
Tabla 3-6: Dureza de materiales más usados en hardfacing .....	67
Tabla 3-7: Síntesis de resultados de Dureza y Pérdida de masa.....	78
Tabla 3-8: Resultados del ensayo de desgaste y dureza .....	82



## Introducción

El desgaste es la pérdida de material de una superficie sólida ocasionado por el movimiento relativo de éste ante otro cuerpo ya sea sólido, líquido o un gas. Actualmente la problemática del desgaste es estudiada ya que representa grandes pérdidas económicas en la industria como por ejemplo; la gran y pequeña minería, la agroindustria, centrales hidroeléctricas e hidráulicas, etc. El siguiente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento frente al desgaste de recubrimientos duros de soldadura o “Hardfacing”.

El método de los recubrimientos duros es uno de los más viables y económicos para mejorar la productividad de componentes mecánicos sometidos a severas condiciones de desgaste, sin embargo existe una creciente tendencia al alza de precios de los insumos utilizados para fabricar los electrodos de estos recubrimientos, lo cual motiva el interés de la industria en investigar nuevas composiciones de electrodos que permitan reducir los costos de fabricación sin que se comprometa la función del recubrimiento.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos; el primero nos proporciona un enfoque global de lo que es el desgaste, sus mecanismos y los factores que lo que lo incrementan.

Se explica el método de ensayo realizado para evaluar la resistencia al desgaste y finalmente se recopiló información de los efectos de ciertos elementos de aleación en la metalurgia de distintos recargues duros utilizados actualmente en la industria, este capítulo es una fuente que permitió predecir anticipadamente las posibles microestructuras que podríamos obtener basándonos en la composición química del electrodo de revestimiento y la dureza de la zona de recargue.

En el segundo capítulo detallamos como primer paso las variables a evaluar en este trabajo, efecto del contenido de FeV (2.85%,3.85%,5.85%) en el revestimiento de electrodos con 5% de FeTi y libres de grafito sobre la resistencia al desgaste de recargues de soldadura; seguidamente se explicó los ensayos realizados para caracterizar los recargues producidos (análisis químico, ensayo metalográfico, ensayo de dureza), finalmente se detalló el procedimiento para evaluar la resistencia al desgaste según la norma ASTM-G65.

En el tercer capítulo se procedió a discutir y analizar los resultados obtenidos de cada ensayo de tal forma que podamos cumplir con los objetivos de esta tesis. Mediante la descripción de los procesos experimentales (ensayo de desgaste, análisis químico, análisis metalográfico, ensayo de dureza) y la presentación de resultados se logró evaluar la influencia del diferentes contenidos de FeV en los electrodos de recubrimientos especialmente preparados para esta tesis y que servirán como parte esencial de un proyecto conjunto que busca conocer el efecto de distintos elementos de aleación en el comportamiento frente al desgaste de recubrimientos duros de soldadura.

Finalmente, en el cuarto y último capítulo se presentan las conclusiones del presente trabajo.



## CAPÍTULO 1

### 1. MARCO TEÓRICO

El desgaste es un fenómeno físico que viene siendo muy estudiado debido a sus efectos nocivos. Este capítulo tiene como finalidad brindar un marco teórico que nos permita entender la problemática del desgaste, los mecanismos que existen y los factores que influyen en el desgaste; así mismo proporciona información sobre las formas de mitigar el desgaste, en especial con la utilización de recubrimientos protectores.

Debido a que este es un trabajo experimental que busca comparar el comportamiento de recubrimientos protectores sometidos a condiciones de desgaste abrasivo, se realizó una breve explicación del método de ensayo de desgaste abrasivo que nos permite simular esta condición, poniendo énfasis en la descripción de la máquina y entendimiento de la mecánica de este proceso; que además está estandarizado según la norma ASTM G65.

## 1.1 DESGASTE:

Se define al desgaste como la pérdida progresiva de material sólido de la superficie de un determinado componente, producto del movimiento relativo entre éste y otro cuerpo (sólido, líquido o gas). El desgaste ocurre en muchas situaciones como por ejemplo con equipos para la remoción de tierra, bombas o tuberías para lodos, perforadores de rocas, trituradoras de rocas o minerales, rampas de rocas, etc.

El desgaste es una consecuencia normal del uso de un componente, sin embargo puede llegar a ser más severo de lo permisible. Las picaduras en engranajes, corrosión por cavitación en la superficie de un cilindro, fricción en prensas de ajuste son manifestaciones de desgaste que eventualmente finalizan en el remplazo de las piezas desgastadas o la inutilización de una máquina.

La pérdida de material o deterioro de un componente como consecuencia del desgaste no es un proceso violento, pero a medida que progresa afecta las dimensiones nominales de una pieza, disminuye la eficiencia de trabajo de una máquina o componente mecánicos e incrementa los costos por lubricación o refrigeración para mitigar esos efectos.

Según los mecanismos físicos, la cinemática del proceso y la composición química de los agentes partes del sistema, los principales mecanismos o tipos de desgaste son:

- Desgaste por Abrasión.
- Desgaste por Impacto.
- Desgaste por Erosión.
- Desgaste por Cavitación.
- Desgaste por Fricción.
- Desgaste por Corrosión.
- Desgaste por Fatiga.

### 1.1.1 Desgaste abrasivo:

Se define como el tipo de desgaste que describe situaciones donde las principales causas de deterioro se originan por rayado y/o corte de un material duro y puntiagudo sobre un material más blando. Las protuberancias bajo presión y deslizamiento con otro cuerpo tienden a formar rayaduras profundas mientras penetran la superficie blanda, ocasionando deformación plástica y arranque de material. De la Figura 1-1 la imágenes “a” y “b” muestran como como las imperfecciones o protuberancias superficiales influyen en la pérdida de material, mientras mayores sean las imperfecciones se incrementa la pérdida de material, análogamente para las imágenes “c” y “d” las partículas con movimiento relativo entre dos cuerpos aumenta la tasa de desgaste.

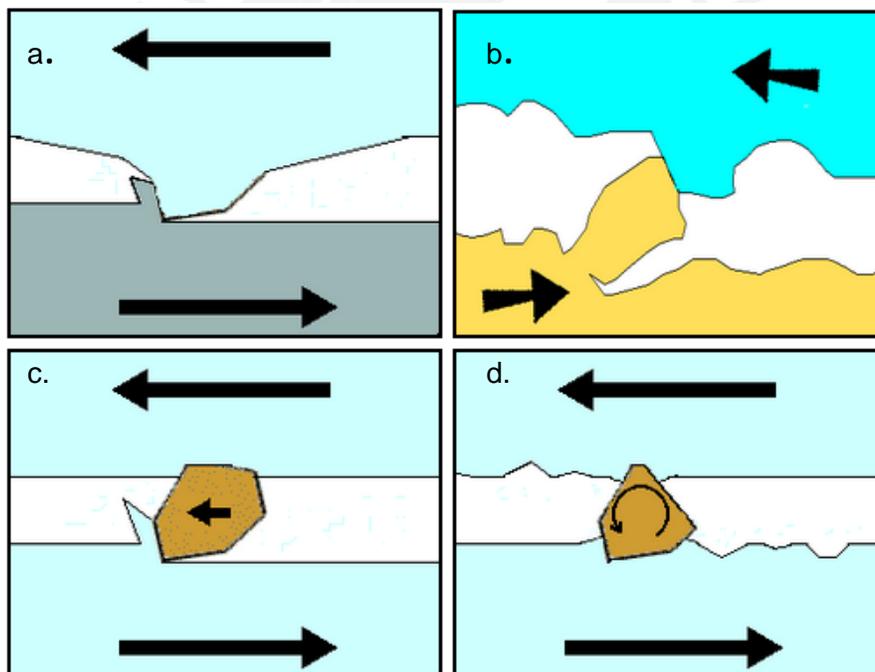


Figura 1-1. Esquema de desgaste abrasivo [1]

La tasa de desgaste depende en gran medida de la capacidad de penetración del abrasivo, lo cual genera una relación con la dureza y la morfología superficial del componente sometido a desgaste.

El efecto de la forma, el tamaño y dureza de las partículas abrasivas; además de la carga o condiciones ambientales de nuestro sistema tribológico permiten clasificar el desgaste según su tasa de desgaste:

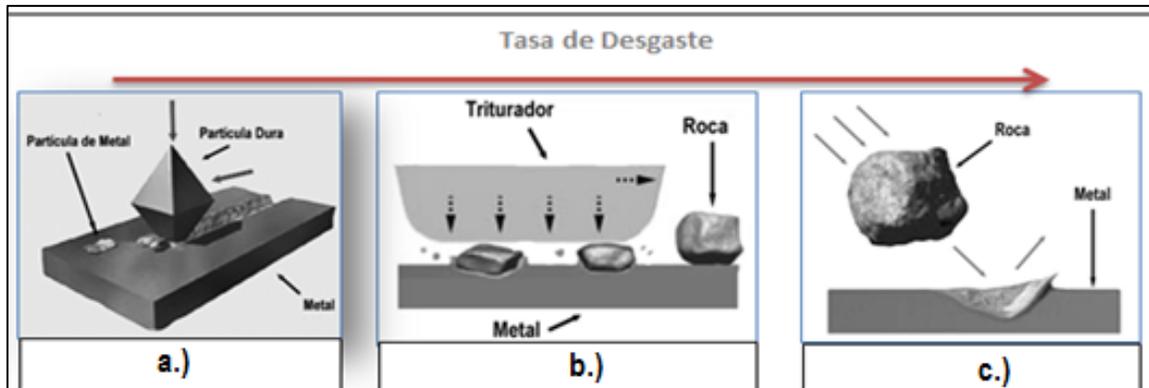


Figura 1-2. a.) Abrasión de bajos esfuerzos. b.) Abrasión de altos esfuerzos. c.) Abrasión penetrante [2].

- ✓ Abrasión pura o de bajos esfuerzos: Se caracteriza por ser el que tiene la menor tasa de desgaste, es decir, es el mecanismo de desgaste menos severo. El ángulo de contacto del abrasivo es muy pequeño y/o los esfuerzos no son lo suficientemente intensos para producir un considerable desprendimiento de partículas sólidas del componente afectado. Los componentes típicos sometidos a esta mecanismo son: tornillos sinfín, canaletas y ductos de transporte de material, implementos agrícolas, etc.
- ✓ Abrasión de altos esfuerzos o pulverizante: Este tipo de desgaste se puede identificar cuando dos superficies se frota entre sí y presionan partículas abrasivas con suficiente fuerza para triturarlas y propiciar la formación de puntas que desgastarán los componentes en contacto, los altos esfuerzos se generan por la reducción del área de contacto de las partículas abrasivas combinada con la aplicación de altas fuerzas normales en la sección. Los

componentes típicos sometidos a esta mecanismo son: palas excavadoras, molinos pulverizadores, rodillos trituradores, etc.

- ✓ Abrasión penetrante: Este tipo de desgaste se presenta cuando la abrasión con bajos y altos esfuerzos viene acompañada de un grado de impacto. Durante el impacto de partículas aplican altas cargas en tiempos de contacto relativamente cortos (micro segundos), resultando en altas velocidades de deformación [1], la pérdida del material se debe a las deformaciones plásticas, posterior endurecimiento y finalmente el desgarre de las partículas metálicas lo cual hace que la tasa de desgaste sea mayor que la de altos y bajo esfuerzos. Los componentes típicos sometidos a este mecanismo son: palas mecánicas o chancadoras de piedras.

### 1.1.2 Desgaste por Impacto:

Se define a este tipo de desgaste como la pérdida de material de una superficie sólida producto del choque o contacto dinámico repetitivo de otro cuerpo sobre dicha superficie.

El desgaste por impacto está cercanamente relacionado al desgaste erosivo; la principal diferencia es que en un desgaste por impacto, los cuerpos o partículas abrasivas tienden a ser grandes, además el contacto se produce de manera localizada y con un flujo controlado; mientras que en la erosión, las partículas abrasivas son pequeñas e interactúan aleatoriamente con la superficie afectada.

En las superficies metálicas, el desgaste por impacto se manifiesta como la deformación de los agentes sujetas a cargas pulsantes. Por lo general puede distinguirse tres zonas tal como se muestra en la Figura 1-3; la zona 1 es la superficie más lejana a la zona de impacto y que está íntegramente formado por el material base que no ha sufrido ningún tipo de deformación; seguidamente se encuentra la zona de deformación, la cual es una zona intermedia y que consiste en material base deformado plásticamente, como se puede apreciar en la figura el grado de deformación aumenta de manera progresiva desde la zona 1 hasta la interface de la zona 3; finalmente podemos identificar a la capa blanca o superficie de contacto, la cual es generalmente homogénea y es ahí donde se inician las deformaciones.

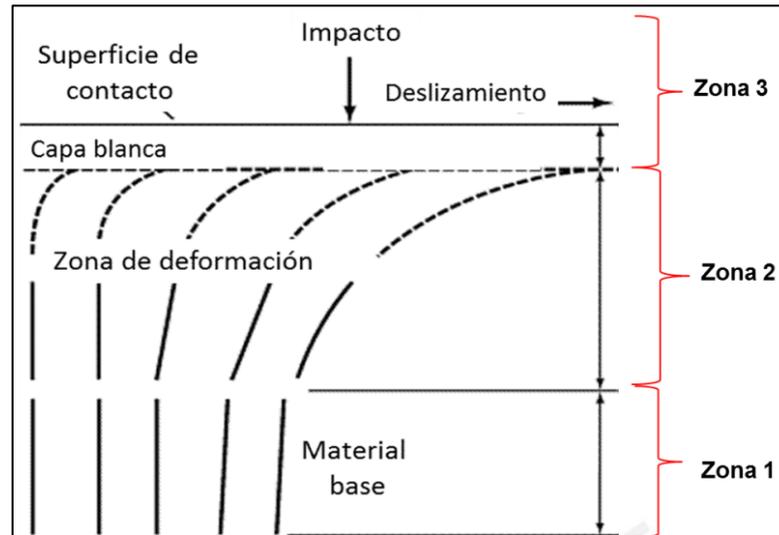


Figura 1-3. Mapa esquemático de las zonas apreciables en una superficie sometida a impacto [3].

Según la Figura 1-4, la zona de deformación puede o no aparecer dependiendo del nivel de fragilidad del material, en superficies con una matriz quebradiza o no deformable se mantiene la capa blanca pero el material base tiende a mantenerse indeformable.

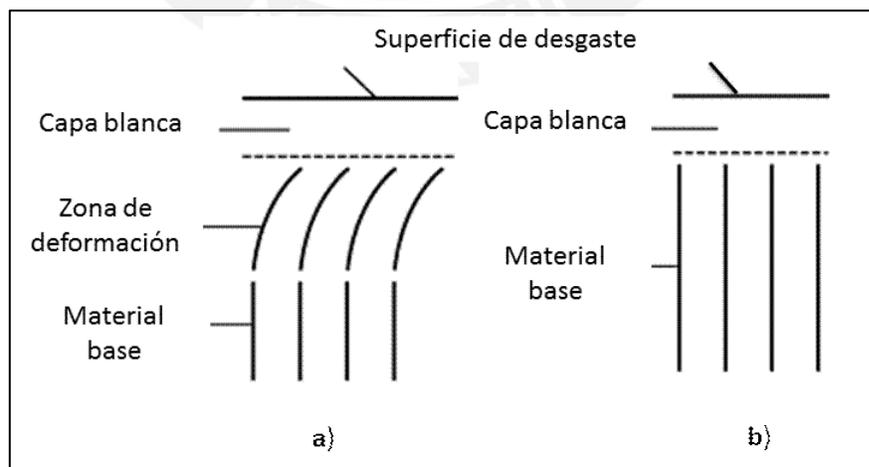


Figura 1-4. a) Matriz deformable. b) Matriz quebradiza. [3].

### 1.1.3 Desgaste por fatiga:

Este tipo de desgaste se presenta cuando un componente está sometido a elevadas cargas durante el deslizamiento repetitivo o rodamiento sobre una pista; debido a la repetición de esta condición de carga se generan superficies que sufren intensas deformaciones lo cual provoca la aparición y propagación de grietas en la superficie de contacto. Este tipo de desgaste se resume como la formación de grietas superficiales o sub-superficiales y propagación de la grieta por fatiga. Es el resultado de aplicar cargas cíclicas en una superficie [4]. La figura 1-5 presenta un esquema del mecanismo de desgaste por fatiga.

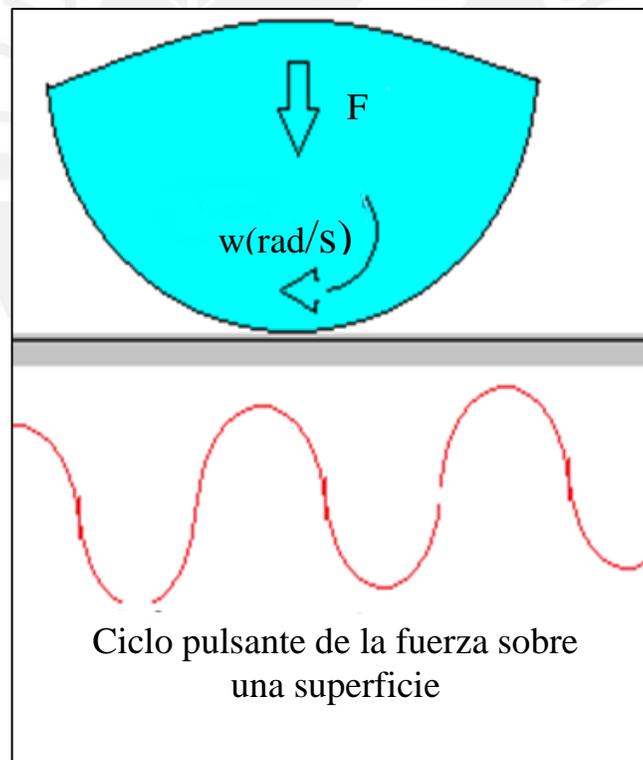


Figura 1-5. Esquema de desgaste por Fatiga [1]

#### 1.1.4 Desgaste Erosivo:

En la Figura 1-6 se representa a este tipo de desgaste, el cual se caracteriza porque las partículas abrasivas se transportan a través de un fluido con un determinado ángulo de incidencia sobre una superficie metálica, el ángulo de incidencia es mayor que en el caso de abrasión por erosión y determina el grado de severidad del desgaste erosivo pues este influye en la capacidad del metal para absorber la energía de impacto o en todo caso la capacidad de deformarse y desprender material.

Tal y como se hizo mención anteriormente, este tipo de desgaste está relacionado con el desgaste por impacto, pero se diferencia principalmente por el tamaño de partículas abrasivas (pequeñas y filudas), la aleatoriedad del número de impactos y la gran incertidumbre de las zonas de choque efectivo por parte de los abrasivos.

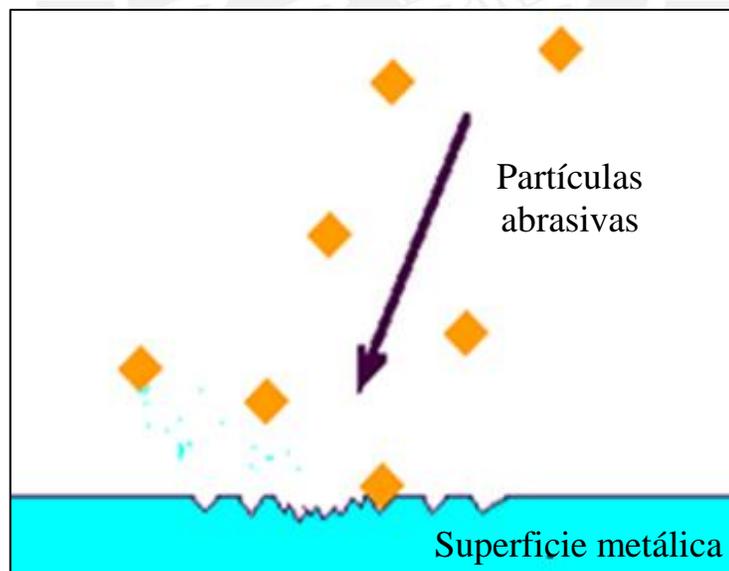


Figura 1-6. Esquema de desgaste erosivo [1]

### 1.1.5 Desgaste por cavitación:

La cavitación se produce cuando un fluido cambia bruscamente su velocidad generando un vacío de tal forma que la presión estática se reduce a la presión de vapor del fluido, bajo estas condiciones se propicia la formación de burbujas que al momento de la implosión son capaces de deteriorar superficies de una pieza mecánica.

La Figura 1-7 muestra una representación esquemática del proceso de desgaste por cavitación, en donde inicialmente la burbuja sometida a cambios de presiones produce un “microjet” que implosiona sobre la superficie dañando la misma.

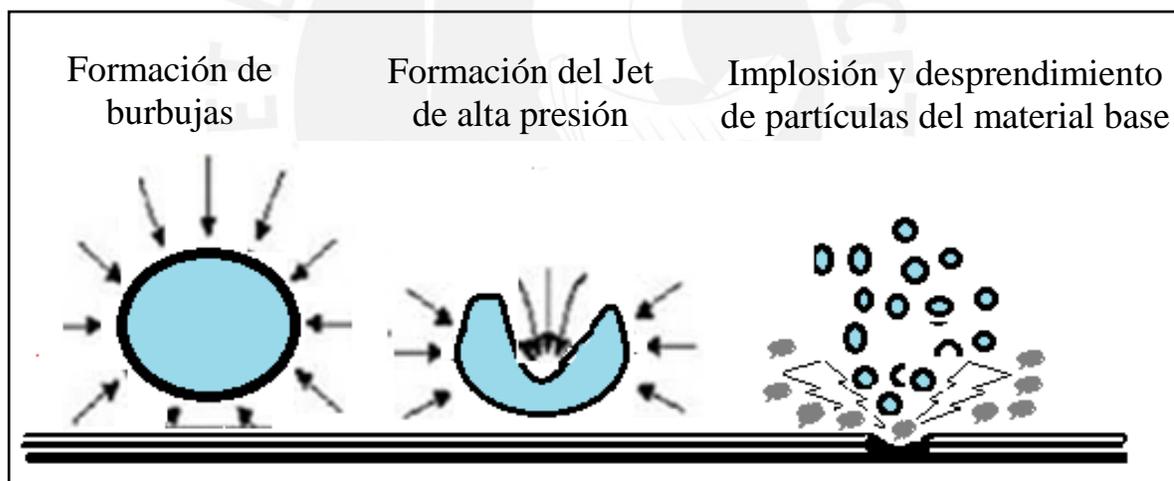


Figura 1-7. Esquema del desgaste por cavitación [1].

Según la teoría de Beeching [5] “el deterioro por cavitación es la desintegración mecánica de las capas superficiales bajo altos pulsos de presión localizados y repetidos. Estos pulsos son ocasionados por la repentina desaparición de las burbujas en contacto con la superficie o cercana a ésta”.

### 1.1.6 Desgaste adhesivo:

A este tipo de desgaste se le conoce como desgaste por fricción, metal-metal o desgaste por deslizamiento; tal como se puede apreciar en la Figura 1-8 se presenta en piezas que se encuentran en contacto deslizante bajo la acción de una carga. El desgaste adhesivo también ocurre como resultado de la destrucción de la interface de unión de las superficies en contacto, de esta manera parte del material arrancado de una superficie se transfiere a la otra generando una superficie mucho más rugosa y propiciando mecanismos de desgaste más severos.

Este tipo de desgaste se relaciona íntimamente con el “coeficiente de fricción”, el cual puede disminuirse introduciéndose películas de lubricante antifricción de tal forma que se puede evitar el contacto directo de metal con metal.

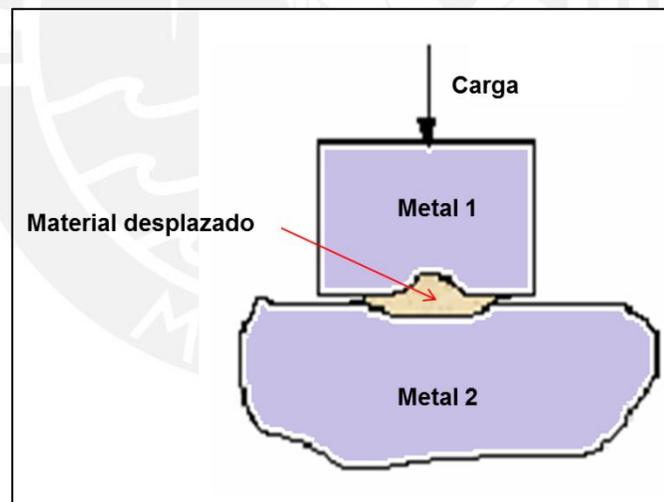


Figura 1-8. Esquema de desgaste por Fricción [6]

Todos estas formas de desgaste se explicaron individualmente, sin embargo el desgaste no es un fenómeno fácil de evaluar ya que en la mayoría de los casos sus diferentes mecanismos o formas de manifestarse no aparecen de manera aislada, más bien en una aplicación real se pueden encontrar dos o tres mecanismos actuando simultáneamente y

a eso le debemos sumar las condiciones de presión o temperatura a las que está sometido nuestro sistema tribológico, por ejemplo:

- Impacto, abrasión y presión: Chancadoras, molinos o rodamientos de maquinaria pesada
- Impacto, abrasión y temperatura: Dados de moldeo, martillos o cuchillas de cizalla
- Abrasión, erosión y corrosión: Tuberías, bridas y válvulas
- Fricción, corrosión y cavitación: Álabes de turbinas o rotores de bombas

## **1.2 FACTORES QUE AFECTAN EL DESGASTE:**

### **1.2.1 Dureza:**

En general la tasa de desgaste crece conforme aumenta la dureza del agente desgastante. Con el fin de aumentar la resistencia al desgaste se debe buscar incrementar la dureza de materiales sometidos a condiciones severas de desgaste, mediante el uso de tratamientos térmicos o elementos aleantes que promueven la generación de microestructuras duras. En la Figura 1-9 se puede observar como al incrementar el contenido de grafito se incrementa la dureza y la formación de microestructuras con carburos finos y duros en la matriz, disminuyéndose el volumen desgastado.

Dependiendo de la dureza de los materiales que intervienen en un proceso de desgaste se puede observar tres regímenes [7]:

- Régimen débil: cuando la dureza del abrasivo es menor que la del metal.
- Régimen de transición: cuando la dureza del abrasivo es aproximadamente la dureza del metal
- Régimen severo: cuando la dureza del abrasivo es mucho mayor que la del metal

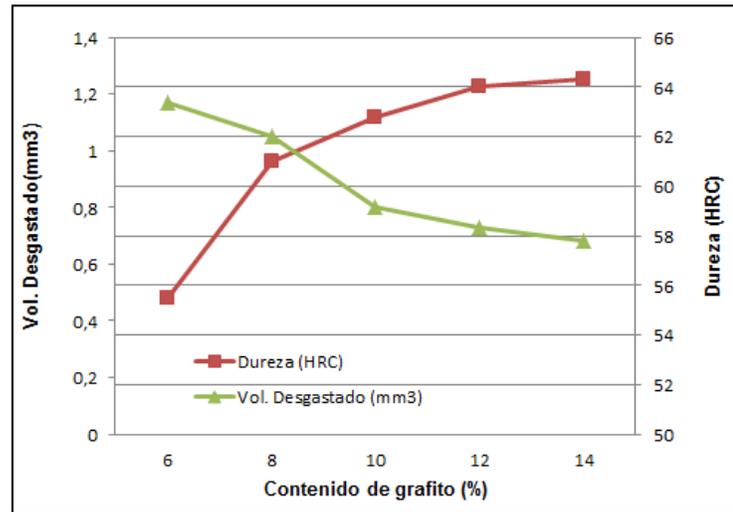


Figura 1-9. Relación Dureza vs. % grafito y Volumen desgastado vs. % grafito [8]

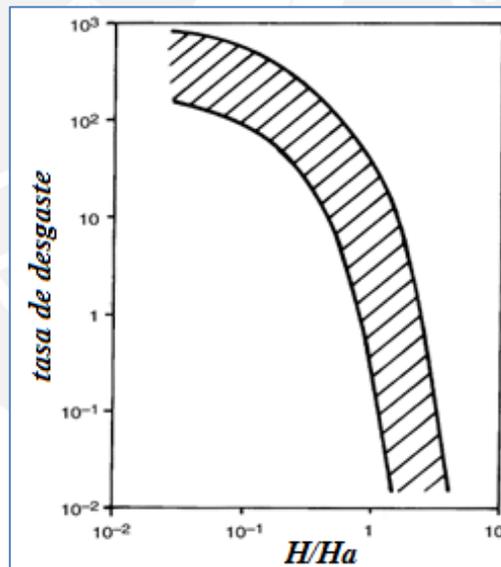


Figura 1-10. Tasa de desgaste vs (H/Ha) [3]

Adicionalmente Wang [8] menciona que las partículas abrasivas solo ocasionan rayaduras en la superficie de un componente mecánico si la dureza del agente desgastado es menor que 1.2 veces la dureza del agente abrasor; en la Figura. 1-10 se puede apreciar como la tasa de desgaste disminuye considerablemente cuando la relación de dureza del material desgastado ( $H$ ) y del abrasivo ( $H_a$ ) se acerca a la unidad o son aproximadamente iguales.

Además de la dureza existen otros factores que interviene en el proceso de desgaste, por ejemplo evaluando el coeficiente de desgaste [4] de la ecuación de Archard (*relación 1.1*), el volumen desgastado es directamente proporcional a la carga aplicada pero inversamente a la dureza superficial del material.

$$k \cong \frac{V_{\text{desgastado}} * \text{Dureza}}{\text{Carga}} \quad [\text{relación 1.1}]$$

De la Figura 1-11, el coeficiente de desgaste (k) es característico del sistema tribológico en el que está actuando, este es un dato experimental que proporciona información del grado de severidad del proceso de desgaste, su valor siempre depende de la mecánica del sistema.

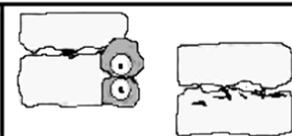
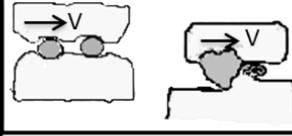
Mecanismo de Desgaste		Coef. Desgaste (k)
		10 <sup>-7</sup> 10 <sup>-6</sup> 10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-2</sup> 10 <sup>-1</sup> 10 <sup>0</sup>
Desgaste por Fricción		suave severo
Desgaste por Abrasión		3 cuerpos 2 cuerpos
Desgaste por Erosión		

Figura 1-11. Relación entre el mecanismo y coeficiente de desgaste [4]

### 1.2.2 Acabado Superficial:

Ningún proceso de mecanizado o fabricación de una pieza nos proporciona superficies perfectas, como se puede apreciar en la Figura 1-12 mientras más rugosas sean las superficies en contacto de cuerpos que se encuentran en movimiento relativo, se incrementará el desgaste abrasivo; esto es debido a que el rozamiento entre protuberancias originan el desprendimiento de material sólido del componente sometido a desgaste, además que las partículas ya desprendidas incrementarán el desgaste puesto que actuarán como partículas abrasivas muy pequeñas y concentradoras de altas cargas.

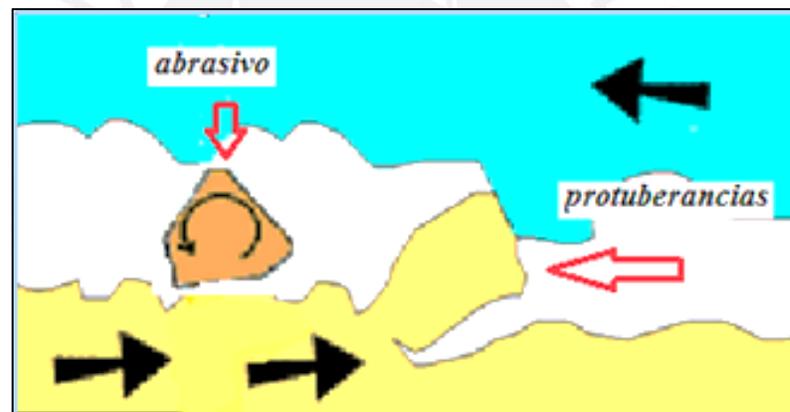


Figura 1-12. Efecto de las rugosidades en el desgaste [1]

### 1.2.3 Velocidad:

La velocidad con la que interactúan los agentes tribológicos es un factor sumamente importante ya que interviene directamente con el incremento en la temperatura de la interface de deslizamiento [2]; tal como se muestra en la Figura 1-13 obtenidos de un ensayo de desgaste abrasivo, un aumento de temperatura supondría que la dureza del material disminuiría y por tanto se espera un aumento en la tasa de desgaste, esto sucederá si la temperatura de la interface es lo suficientemente elevada.

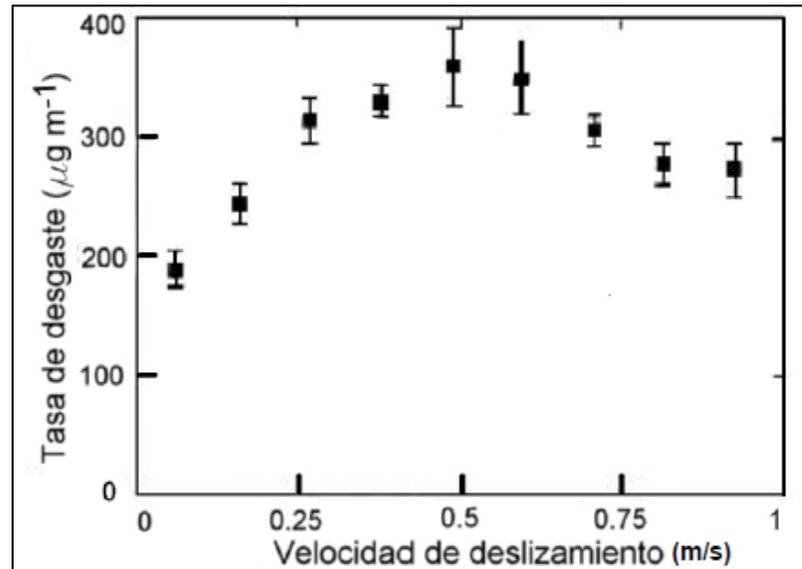


Figura 1-13. Tasa de desgaste vs. Velocidad de deslizamiento [9].

#### 1.2.4 Partículas Abrasivas:

El tamaño y la forma de las partículas como se muestra en la Figura 1-14, junto con la magnitud de carga que se aplica tiene influencia en el mecanismo o tipo de desgaste que predomina, está demostrado que mientras mayor sea la dureza de las partículas abrasivas, se incrementa la tasa de desgaste de un componente en contacto con estas partículas. Con relación a la microestructura partículas duras pueden extraer fases pequeñas o cortar y romper grandes fases en una microestructura, mientras que las partículas suaves son capaces de cavar la superficie o crear grietas [10].

#### 1.2.5 Carga:

Dwivedi [11] demostró experimentalmente que el aumento de la carga normal sobre dos superficies que se encuentran en deslizamiento uno a uno incrementa el coeficiente de desgaste abrasivo, se puede notar en la Figura 1-15 los efectos en la tasa de desgaste dependiendo de la magnitud de la carga aplicado en un ensayo de ASTM G65.

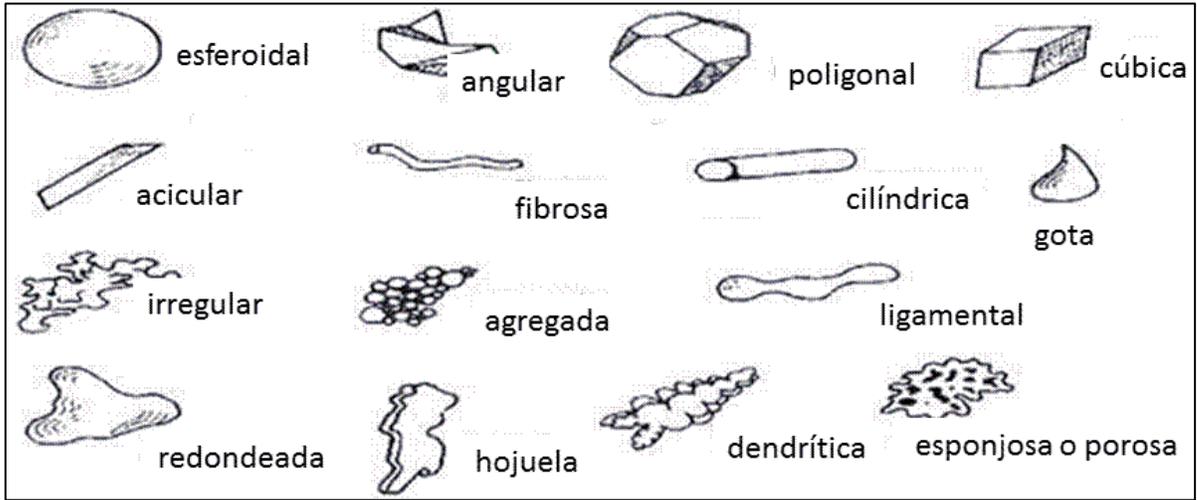


Figura 1-14. Formas probables de partículas abrasivas [12].

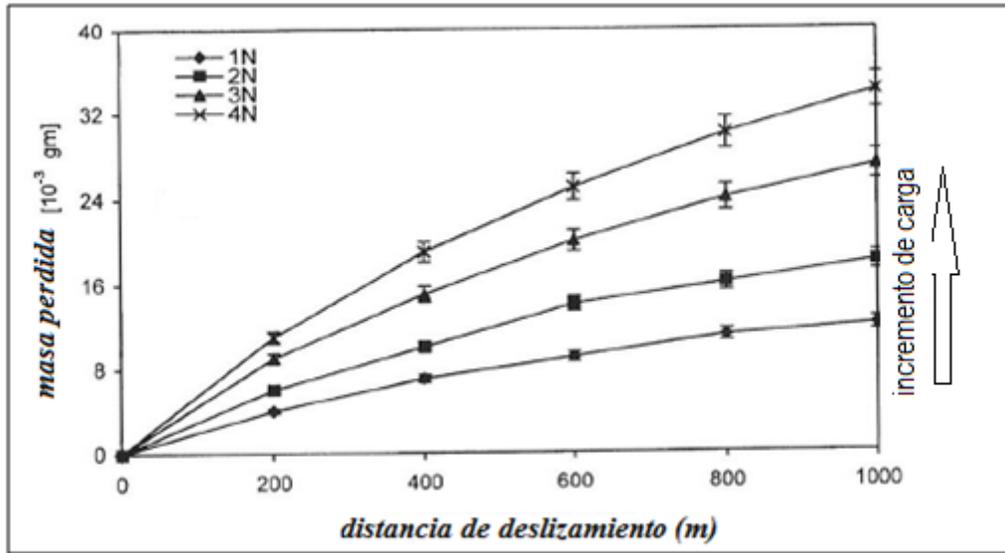


Figura 1-15. Efectos de la carga en la tasa de desgaste [11].

### 1.3 RECUBRIMIENTOS PROTECTORES-HARDFACING:

Actualmente gran parte de los gastos de una empresa son consecuencia del constante cambio de componentes mecánicos producto del deterioro ocasionado por efectos del desgaste. Es así; y tomando en cuenta consideraciones económicas y de factibilidad de procedimientos que los HARDFACING o recargues duros son métodos muy difundidos para mitigar los efectos del desgaste.

Los recargues duros son procesos de recubrimiento de protección que consisten en el depósito de una o más capas de soldadura sobre una superficie desgastada o deteriorada, el objetivo es de recuperar o poner en operatividad alguna pieza mecánica; cabe recalcar que este proceso también se utiliza como una etapa final en la fabricación de una pieza que va a estar sometido a condiciones de desgaste severo.

Los recubrimientos protectores permiten [13]:

- Recuperar piezas desgastadas o deterioradas.
- Reparar elementos de máquinas
- Proteger las superficies de las piezas o elementos sujetos a fuertes desgastes, prolongando su vida útil
- Construir piezas con materiales más baratos, aplicando el recargue protector sólo en las superficies que requieren protección

Como se ha visto y mencionado anteriormente, existen diferentes mecanismos de desgaste; y la selección del tipo de recubrimiento se basa precisamente en el mecanismo que envuelve el componente mecánico y en el material base, además es igual de importante determinar el procedimiento más adecuado para el depósito de dicho recubrimiento, ya sea por soldadura, rociado térmico, electrodeposición, etc.

Los recubrimientos por soldadura son usados para resistir muchos tipos de desgaste y los componentes más utilizados son principalmente aleaciones y carburos [14]. Se deben considerar al menos tres de los siguientes factores en la aplicación de un recubrimiento: el metal base, la composición y forma de la pieza, la aleación del recubrimiento y el proceso de soldadura.

En la industria existen muchos tipos de recubrimientos protectores que tienen excelente rendimiento y resultados predecibles; sin embargo la selección de un adecuado recubrimiento protector necesita del conocimiento de:

- El grado de desgaste en la cual opera un equipo
- La función de la pieza o equipo
- El metal base donde será aplicado

Además existen algunas consideraciones adicionales:

- Cuando las piezas están muy desgastadas es necesario restaurarlas cerca de sus medidas originales para posteriormente aplicar el recubrimiento protector
- Solo cuando la pérdida del material es muy grande se recomienda utilizar postizos
- En el proceso por arco eléctrico se recomienda utilizar dos pases de recubrimiento protector de alta dureza
- La forma de los pases y de los cordones de soldadura están relacionadas a las condiciones de servicio, ya que la forma del cordón puede influir en el tiempo de servicio del recubrimiento y en el gasto de energía para realizar el proceso
- Finalmente es importante seleccionar bien el diámetro del electrodo que se utilizará y supervisar las condiciones de voltaje y amperaje en el proceso mismo de depósito del recubrimiento

En la Figura 1-16 se observa el esquema de una secuencia de recargue de protección, la disposición del recargue dependerá del componente mecánico y las condiciones de desgaste a las que estará sometida la pieza.

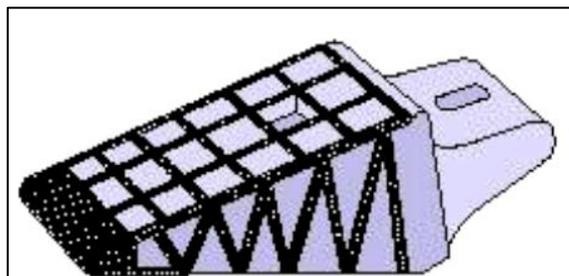


Figura 1-16. Componente mecánico con aplicación de recubrimiento protector [14]

### 1.3.1 Principales elementos que componen un recubrimiento protector:

Para el revestimiento de un electrodo de soldadura para un recubrimiento protector se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas, como arena de zirconio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, polvo de hierro, FeSi, FeV, FeTi, FeMn, etc. Normalmente se realiza un análisis individualizado de la calidad y composición de estos productos. La composición de los revestimientos suele ser muy compleja, se trata generalmente de una serie de sustancias orgánicas y minerales.

En la fabricación de la pasta para el revestimiento suelen intervenir:

- Óxidos naturales: óxidos de hierro, ilemita (50% óxido férrico y 50% óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- Silicatos naturales: caolín, talco, mica
- Productos volátiles: celulosa, aserrín
- Fundentes
- Productos químicos: carbonatos, óxidos, etc.
- Ferroaleaciones: de Mn, Si, Ti, V, etc.
- Aglomerantes: silicato sódico, silicato potásico

Durante los últimos años se ha marcado una tendencia al alza con respecto a los precios internacionales de los minerales, por ejemplo se puede apreciar en la Tabla 1-1 que el Cromo, que es uno de los principales elementos aleantes de la mayoría de electrodos de recubrimientos convencionales, han sufrido un considerable incremento de precios desde el 2007 hasta el 2011, otras sustancias necesarias para la fabricación de recubrimientos duros también presentan esta tendencia; sin embargo para abaratar costos no podemos prescindir de componentes que aporten propiedades antidesgaste y es necesario buscar optimizar esta tecnología para que sea económicamente viable.

Tabla 1-1 Precio de minerales usados en recubrimientos protectores desde 2007-2011 [15]

	Dólares por tonelada				
	2007	2008	2009	2010	2011
<b>Cromo</b>	8331.0	11078.0	9896.0	11322.0	14500.0
<b>Grfito natural</b>	2219.0	2250.0	1410.0	1700.0	2070.0
<b>Mica húmeda</b>	683.0	651.0	651.0	700.0	700.0
<b>Talco</b>	114.0	125.0	111.0	150.0	157.0
<b>Rutilo</b>	488.0	525.0	533.0	540.0	1400.0
<b>Silicio</b>	2486.0	3564.0	2552.0	3080.0	3300.0
<b>Zinc</b>	3388.0	1955.8	1713.8	2244.0	2332.0
<b>Carburos de Silicio</b>	550.0	835.0	557.0	793.0	1250.0
<b>Hierro</b>	53.9	59.6	70.4	92.8	90.0

#### 1.4 ENSAYO DE DESGASTE:

En la actualidad existen muchos métodos para evaluar el desgaste de un material, sin embargo en este trabajo se evaluó el desgaste según la norma ASTM G65, el cual es un método estandarizado para realizar mediciones de desgaste abrasivo usando arena seca como partícula abrasiva y una rueda de caucho como parte del sistema tribológico que permitirá el contactado directo de la arena con la probeta a ensayar.

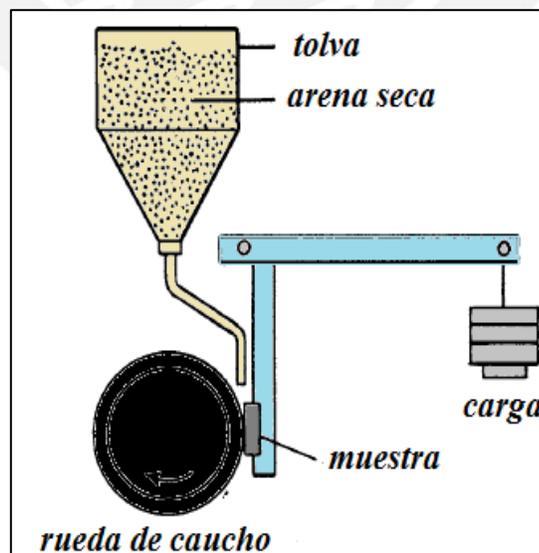


Figura 1-17. Esquema de máquina según norma ASTM G 65 [3]

En la Figura 1-17 se esquematiza los componentes de la máquina de desgaste y el principio físico del método es relativamente sencillo ya que se basa en la pérdida de material producido por un agente abrasivo que se encuentra en movimiento unidireccional relativo a la probeta a evaluar.

Según el esquema de la Figura. 1-17 el abrasivo (arena seca) se desliza entre la rueda de caucho y la muestra a evaluar y debido al efecto palanca que existe entre la muestra y la carga, se presiona la probeta con la rueda que está girando a una determinada velocidad, esto último junto con el movimiento de las partículas abrasivas propician la pérdida de material en la muestra, el procedimiento de evaluación de la tasa de desgaste tiene como pilar medir la diferencia gravimétrica de la probeta ensayada en un determinado tiempo.

El alcance de la norma contempla cinco diferentes procedimientos, cuya utilización de uno u otro depende de las características de la probeta a evaluar; a continuación se procederá a señalar los procedimientos que tienen el objetivo común de clasificar materiales metálicos en función de su resistencia al desgaste.

- Procedimiento A: Útil para clasificar materiales de media a alta resistencia al desgaste abrasivo
- Procedimiento B y E: Útil para clasificar materiales de media a baja resistencia al desgaste abrasivo
- Procedimiento C-A: Se utiliza cuando deseamos evaluar el efecto de capas de recubrimientos delgados
- Procedimiento D: Particularmente usado para clasificar materiales de baja resistencia al desgaste abrasivo

Tal como se explicó en el punto 1.2 de este capítulo, la severidad del desgaste va a depender entre otras cosas del tamaño del abrasivo, forma, dureza, carga o presión de contacto entre la probeta y la rueda. Estas consideraciones para evaluar desgaste, están exclusivamente limitadas a condiciones de desgaste puro de bajos esfuerzo y los resultados que se obtendrán solo pueden predecir el comportamiento de materiales metálicos bajo condiciones específicas donde el mecanismo de desgaste predominante es el abrasivo.

A pesar que el comportamiento de un material frente al desgaste es diferente según el sistema tribológico [5], la mejor manera de presentar los resultados y siguiendo la recomendación de la norma ASTM G 65 es evaluando la velocidad o tasa de desgaste tal como se puede apreciar en la relación 1.2.

$$v = \frac{\Delta V}{T} \quad \text{[relación 1.2]}$$

*v*: tasa de desgaste .

$\Delta V$ : variación de volumen de la probeta.

*T*: tiempo de ensayo.

Es también un objetivo de este trabajo que los resultados puedan ser comparados con investigaciones anteriores y servir como referencia de futuras aplicaciones sin que exista confusión alguna en lo concerniente al método de medición de la tasa de desgaste.

### **1.5 MICROESTRUCTURAS RESISTENTES AL DESGASTE:**

El objetivo de este punto es servir como una fuente que permitirá predecir según el contenido de elementos aleantes, la microestructura que obtendríamos una vez realizado el proceso de recargue por soldeo.

Tal como se muestra en los esquemas de la Figura 1-48, la mezcla de dos fases que resulta de la fase eutéctica producto de la solidificación puede tener diferentes ordenamientos microestructurales, tales como estructuras continuas de láminas o barras, además de arreglos esferoidales o irregulares. Estos ordenamientos se pueden identificar en las imágenes de las diferentes microestructuras de recargues duros que han sido objeto de investigación de este capítulo.

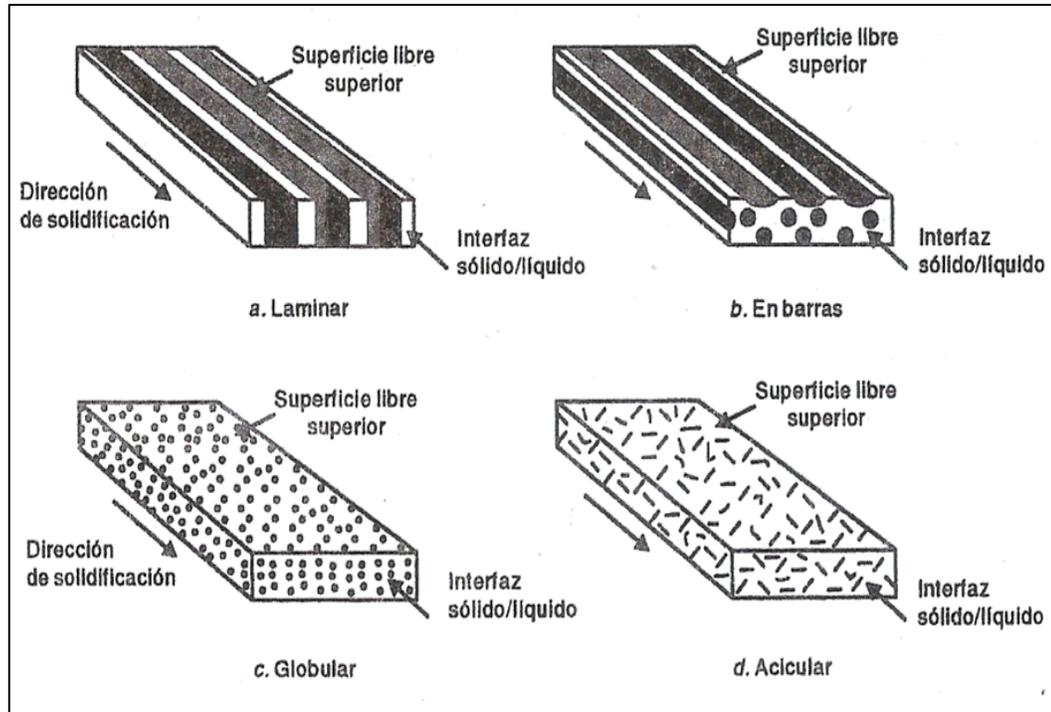


Figura 1-18. Representación esquemática de las diferentes microestructuras eutécticas [7]

El rol de la microestructura en la resistencia al desgaste está limitado por el efecto total que tiene en las propiedades mecánicas del material, la tasa de desgaste está particularmente relacionada con la dureza, debido a que su efecto influye en el comportamiento de la microestructura ante deformaciones plásticas, en la Figura 1-19 se puede apreciar el efecto de la microestructura y la dureza en la resistencia al desgaste abrasivo de altas cargas en un acero al carbono.

La resistencia a la abrasión de microestructuras de aceros disminuye según la siguiente relación:

*Martensita > Perlita > Bainita > Austenita*

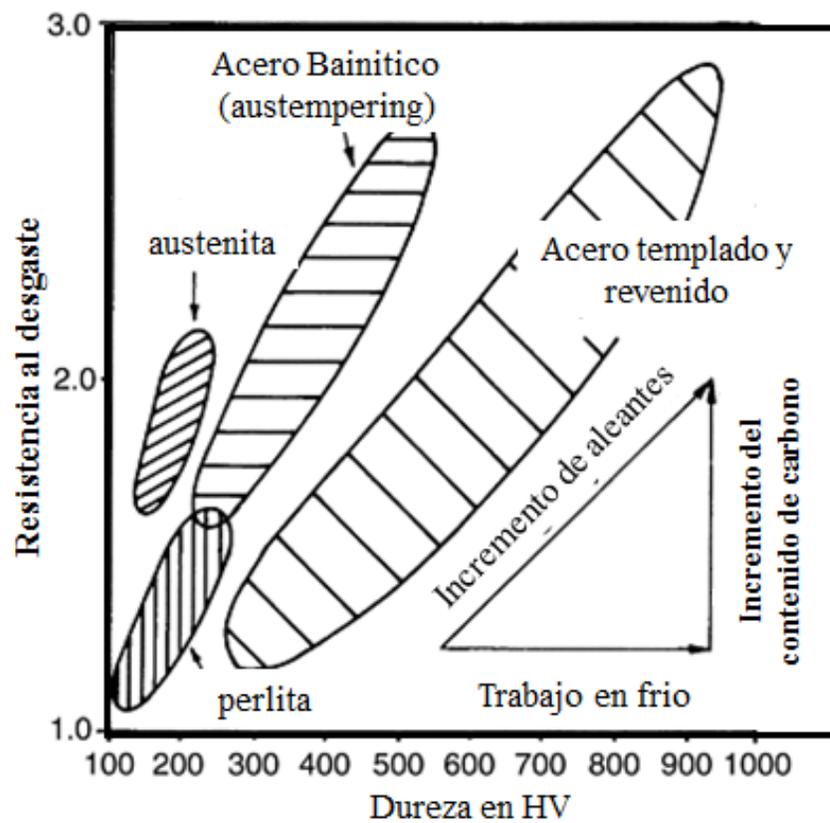


Figura 1-19. Efecto de la microestructura y la dureza en la resistencia al desgaste abrasivo [3]

### 1.5.1 Denominación de recubrimientos duros y microestructuras características:

Como se ha mencionado anteriormente, los recubrimientos duros pueden contener o estar formados por una gran cantidad de aleaciones (Cr, Mn, Si, Mo, Ni, Nb, V, W o Ti), la selección de un determinado tipo de electrodo protector no es una tarea fácil; sin embargo de cierta manera esto se facilita ya que las aleaciones depositadas como capas de soldadura poseen ciertas características que determinan su comportamiento y propiedades frente a un determinado mecanismo de desgaste.

Según las condiciones de trabajo es posible identificar la capa de recubrimiento más adecuada y que pueda aminorar las pérdidas producidas por el desgaste. En la Figura 1-20 se puede apreciar una relación entre la composición química del recargue con los diferentes mecanismos de desgaste.

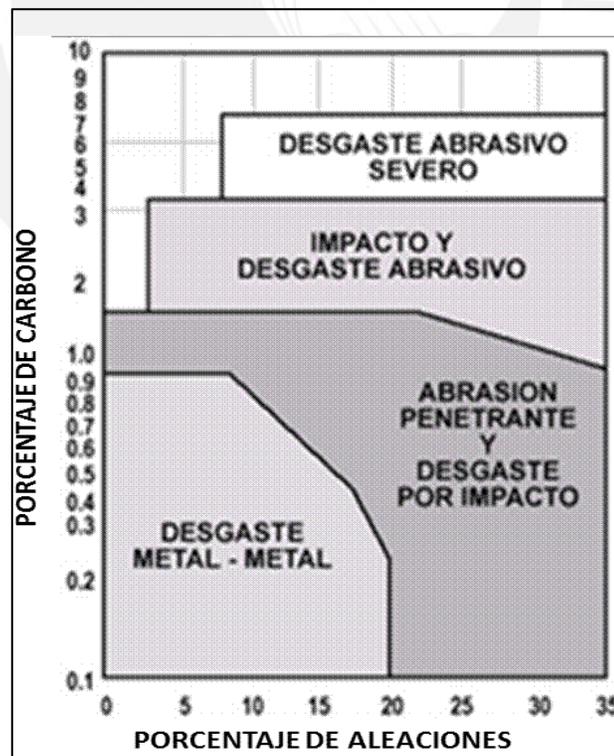


Figura 1-20. Comportamiento de recubrimientos en base Fe ante un mecanismo de desgaste según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes [17].

A diferencia de los electrodos utilizados para la unión de piezas, los electrodos de recubrimiento son aleaciones frecuentemente desarrolladas cuidadosamente por cada empresa. Muy pocos de ellos se clasifican según la AWS (American Welding Society); pero en general los recubrimientos se pueden clasificar en cuatro categorías:

a) Aleaciones base Hierro:

Son las recargas más utilizados e incluyen una gran gama de aleaciones. Estos van desde los aceros de baja aleación que contienen entre 2-12 % de elementos de aleación, y los de alta aleación con contenidos entre 12-50% de elementos de aleación.

b) Aleaciones base Níquel:

Contienen entre un 70-80% de níquel, cromo 11-17%, 2,5-3,5% de boro, y 0,30-4,5% de silicio. Es una característica la formación de carburos y boruros en la matriz, lo cual le aporta una gran resistencia al desgaste abrasivo a bajas temperaturas. Estas aleaciones son ideales para el desgaste metal con metal.

c) Aleaciones base Cobalto:

Las aleaciones base cobalto contienen 45-63% de cobalto, cromo 24-29%, 5,50-13,5% de tungsteno y 1,10-3,20% de carbono. Estas aleaciones son las más versátiles pues son resistentes al calor, corrosión, abrasión, bajas cargas de impacto y desgaste metal con metal.

d) Aleaciones base Tungsteno:

Las aleaciones de tungsteno producen la mayor resistencia contra el desgaste. Se componen de granos de carburos de tungsteno distribuidos en una matriz de hierro, acero al carbono, aleaciones de cobalto, aleaciones de níquel.

Las aleaciones menos costosas son las que tienen base Hierro y conforme se mejoran características mecánicas se cumple la siguiente relación en costos:

$$A. Tungsteno > A. Cobalto > A. Níquel > A. Hierro$$

En general un recubrimiento de soldadura según ISO/TC44/SC3 se designa según el tipo de electrodo que se utiliza, la aplicación, el elemento base de las aleaciones y el tipo de microestructura que lo caracteriza,

En el alcance de este trabajo se incluye solo recubrimientos duros base Fe, la mayoría de estos se pueden clasificar dentro de 17 categorías (tabla 1-2).

Tabla 1-2 Designación de recubrimientos según su microestructura [18]

	Microestructura	Composición Química	Dureza HV
Fe-FS	Mayor presencia de ferrita con fase secundaria	• Carbono: Hasta 0.3% • E. Aleantes (%): Hasta 6%	De 200 a 400
Fe-M1	Acero martensítico de baja aleación	• Carbono: Desde 0.3% hasta 0.8% • E. Aleantes: hasta 6%	De 446 a 697
Fe-M2	Martensita con edurecimiento secundario	• Carbono: Desde 0.2% hasta 1.5% • E. Aleantes: Desde 7% hasta 20%	De 446 a 697
Fe-M3	Inoxidable martensítico	• Carbono: Desde 0.05% hasta 0.6% • E. Aleantes: Desde 10% hasta 20%	De 302 a 595
Fe-M4	Martensita con envejecimiento	• Carbono : 0.02 % • E. Aleantes : 17% Ni, 4% Mo,9% Co, 0.5% Ti + V	De 302 a 392 (STT) De 513 a 595 (CTT)
Fe-MA	Aproximadamente igual cantidad de martensita y austenita	• Carbono: Desde 0.8% hasta 1.5% • E. Aleantes: Desde 10% hasta 20%	De 392 a 697
Fe-MK	Martensita con carburos	• Carbono: Desde 1% hasta 3% • E. Aleantes: Mínimo 13%.	De 513 a 595
Fe-MEK	Martensita con mezcla eutéctica (austenita-carburos)	• Carbono: Desde 2% hasta 3% • E. Aleantes: Desde 6% hasta 15%	De 446 a 697
Fe-A	Inoxidable austenítico con bajo contenido de ferrita.	• Carbono: Desde 0.02% hasta 0.15% • E. Aleantes: Mínimo 40%.	De 188 a 263
Fe-AF	Inoxidable austenítico con alto contenido de ferrita.	• Carbono: Desde 0.05% hasta 0.15% • E. Aleantes: Mínimo 40%.	De 213 a 294HV
Fe-AM	Acero austenítico al manganeso con bajo contenido de cromo	• Carbono: Desde 0.5% hasta 1.12% • E. Aleantes: Mínimo 30%	aprox. 318 HV
Fe-AMC	Acero austenítico al manganeso con similar contenido de cromo y manganeso	• Carbono: Desde 0.3% hasta 0.5%. • E. Aleantes: Desde 25% hasta 40%. Principalmente Mn y Cr en iguales proporciones.	aprox. 294 HV
Fe-AK	Acero austenítico al manganeso con presencia de carburos	• Carbono: Desde 1% hasta 2%. • E. Aleantes: Desde 15% hasta 25%. Principalmente Mn además de fuertes formadores de carburos como Ti o Nb.	De 302 a 492
Fe-PAE	Austenita primaria con mezcla eutéctica austenita-carburos	• Carbono: Desde 2% hasta 3% • E. Aleantes: Desde 15% hasta 35%. Principalmente: Cr y Mo.	De 392 a 595
Fe-NE	Mezcla eutéctica austenita-carburos	• Carbono: Desde 3% hasta 4% • E. Aleantes: Desde 20% hasta 35%. Principalmente Cr y Mo.	De 560 a 653
Fe-PKE	Carburos de cromo primario con mezcla eutéctica (austenita-carburos)	• Carbono: Desde 4% • E. Aleantes: Desde 20% hasta 35%. Principalmente: Cr.	De 653 a 832
Fe-KKA	Carburos de cromo primario con presencia de carburos y mezcla eutéctica (austenita-carburos)	• Carbono: Desde 5%. • E. Aleantes: Desde 25% hasta 40% Principalmente Cr.	De 653 a 940

De manera similar a la Figura 1-20, los tipos de microestructuras referidos en la Tabla 1-2 se pueden predecir según el contenido de carbono y de elementos de aleación que existan en el recargue, tal como se muestra en la Figura 1-21.

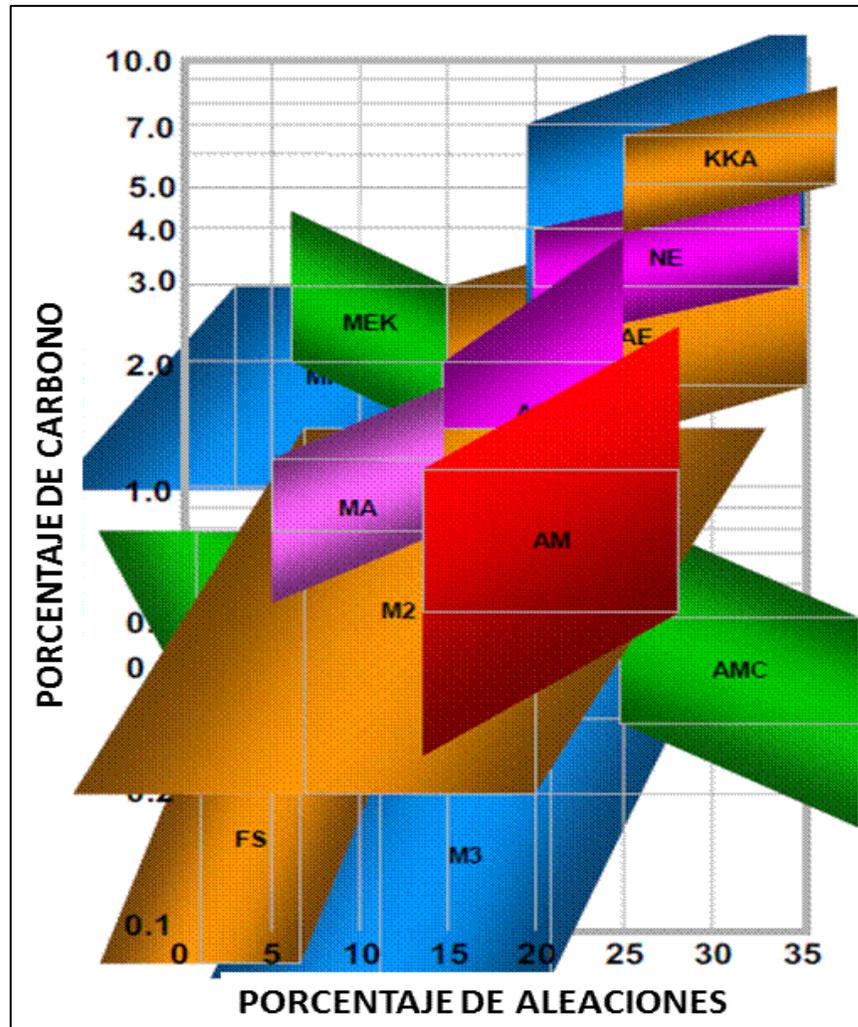


Figura 1-21 Microestructuras de recubrimientos base Fe según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes [18].

Cada uno de los recubrimientos descritos en la Tabla 2-1 presentan una microestructura característica principalmente dependiente de su composición química, esto define sus propiedades mecánicas y su aplicación; por ejemplo:

### **Recargue Fe-FS**

**Microestructura:** Predominantemente ferrita con pequeñas cantidades de perlita, bainita y/o martensita.

#### **Composición Química típica:**

- Carbono: Hasta 0.3%
- E. Aleantes (%): Hasta 6%

**Dureza:** De 200 a 400 HV

En general tienen una excelente resistencia al impacto y hasta una moderada resistencia a la abrasión; este tipo de recubrimientos se utiliza para recuperar piezas desgastadas (desgaste metal-metal) que requieren recuperar sus dimensiones originales.

### **Recargue Fe-M1**

**Microestructura:** Predominantemente bloques de Martensita.

#### **Composición típica:**

- Carbono: Desde 0.3% hasta 0.8%
- E. Aleantes: hasta 6%

**Dureza:** entre 446 y 697HV.

En general tienen una buena resistencia al impacto, posee una mejor resistencia a la abrasión que los Fe-FS. Presentes en piezas sometidas a desgaste metal-metal.



Figura 1-22 Microestructura Fe-FS

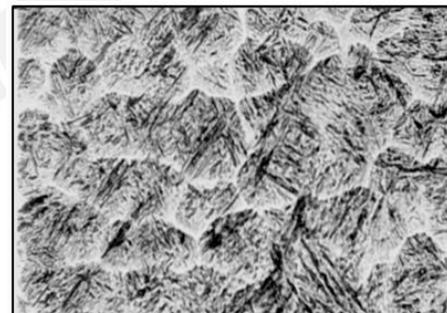


Figura 1-23 Microestructura Fe-M2

### Recargue Fe-M2

**Microestructura:** Martensita de alta aleación con presencia de carburos complejos.

#### **Composición típica:**

- Carbono: Desde 0.2% hasta 1.5%
- E. Aleantes: Desde 7% hasta 20%

**Dureza:** entre 446 y 697HV.

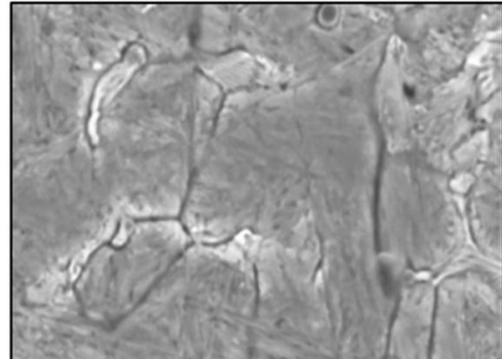


Figura 1-24 Microestructura Fe-M2

Los principales elementos de aleación son: Mo, W, Cr, V. En general tienen una razonable resistencia al impacto la cual disminuye al aumentar el contenido de carbono, además posee una buena resistencia a la abrasión.

Sus aplicaciones se pueden observar en herramientas para cuchillas y dados en frío y/o caliente; conserva sus propiedades a altas temperaturas.

### Recargue Fe-PKE

**Microestructura:** Carburos primarios en una matriz eutéctica austenita-carburos.

#### **Composición típica:**

- Carbono: Desde 4%
- E. Aleantes: Desde 20% hasta 35%.  
Principalmente: Cr.

**Dureza:** entre 653 y 832HV.

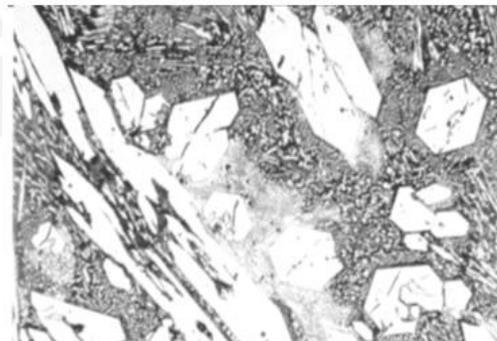


Figura 1-25 Microestructura Fe-PKE

Baja resistencia al impacto, excelente resistencia a la abrasión. Tiene aplicación en condiciones severas de abrasión como en rodillos chancadoras.

**1.5.2 Características específicas de algunos elementos de aleación:**

El contenido de elementos aleantes es tan importante como el metal base; la microestructura final no solo depende del comportamiento que caracteriza a un determinado elemento de aleación de manera independiente, sino que es necesario conocer su influencia sobre la microestructura final del material del recubrimiento duro.

En la Figura 1-26 se puede apreciar que para el caso específico de los aceros la mayoría de los elementos aleantes indicados, son comúnmente formadores de carburos o forman soluciones sólidas, por ejemplo el titanio y el vanadio son fuertes formadores de carburos lo cual nos hace pensar que cualquier proceso que contemple incluir estos elementos de aleación propiciará una microestructura con gran presencia de carburos o al menos una superficie con un alto valor de dureza.

ELEMENTO DE ALEACIÓN	GRUPO 1 DISUELTO EN FERRITA	GRUPO 2 COMBINADO EN CARBURO
Níquel	Ni	
Silicio	Si	
Aluminio	Al	
Cobre	Cu	
Manganeso	Mn	←→ Mn
Cromo	Cr	←→ Cr
Tungsteno	W	←→ W
Molibdeno	Mo	←→ Mo
Vanadio	V	←→ V
Titanio	Ti	←→ Ti

Figura 1-26 Comportamiento de los elementos de aleación más utilizados

Los elementos formadores de carburos están en proporciones mayores que cuando se encuentran como fase carburos, los cantidad de carburos estará limitada por el contenido de carbono, el resto entra en solución sólida con la ferrita lo cual propicia su endurecimiento, el manganeso por ejemplo tiene una gran tendencia a disolverse en la ferrita y endurecer la matriz puesto que todo elemento que forma solución sólida con el hierro afecta la dureza de la ferrita [7].

a) Efectos del Molibdeno:

El molibdeno es un potente formador de carburos, no se oxida con facilidad y con respecto a las propiedades mecánicas se puede mencionar que aumenta la resistencia a la tracción, la resistencia mecánica en caliente, la resistencia a la fatiga, el límite elástico, la dureza, la resiliencia, la templabilidad, la resistencia al desgaste, etc. Pero disminuye la soldabilidad de un acero.

Según Wang [19] el contenido de molibdeno que está presente en el recubrimiento duro se incrementa conforme se aumenta el porcentaje de Fe-Mo presente en el electrodo, esto no se da necesariamente con el titanio y vanadio que tienen una alta afinidad con el oxígeno y tienden a la formación de óxidos durante el proceso de soldeo.

Por otro lado la dureza y la fracción en volumen de los carburos en la capa de revestimiento se incrementan conforme aumenta la presencia de molibdeno, además el efecto que este produce se ve reflejado en la considerable disminución del volumen desgastado de una aleación Fe-Mo (Ver Figura 1-27)

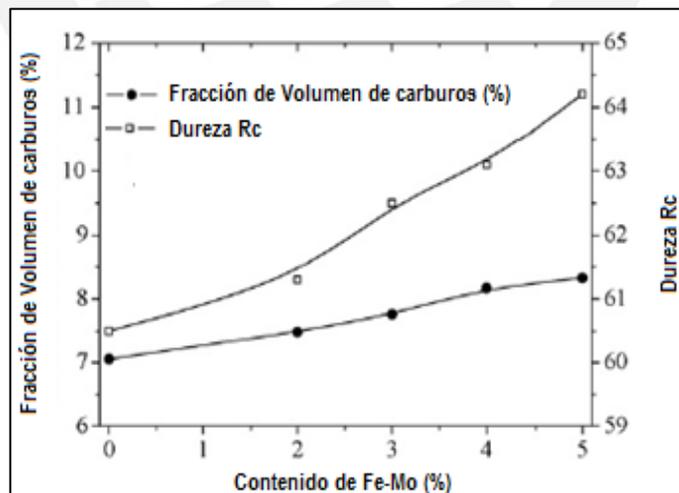


Figura 1-27 Fe-Mo vs. Fracción de volumen de carburos y Fe-Mo vs. Dureza [19]

b) Efectos del Titanio y Vanadio:

Al igual que el molibdeno, el titanio y el vanadio son fuertes formadores de carburos, contribuyen al afinamiento de granos y disminuye la tendencia a las segregaciones.

La microestructura es el factor más importante que influye sobre las propiedades mecánicas de un material, el desgaste es un efecto que puede ser atenuado principalmente incrementando la dureza de la microestructura sometida a estas condiciones.

En Figura 1-28 se muestra el volumen desgastado de recubrimientos base Fe reforzado con partículas de TiC (carburo de titanio) y VC (carburo de vanadio); en el ensayo de desgaste se muestra resultados de pérdida de volumen en función de la distancia de deslizamiento ante la aplicación de una carga de 49 N.

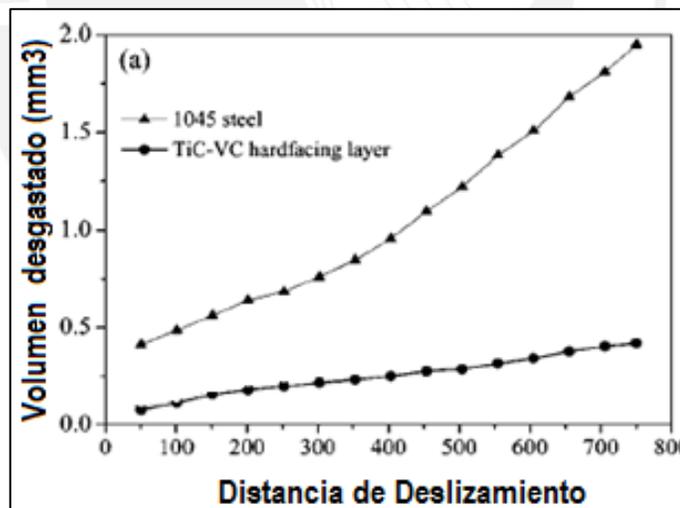


Figura 1-28 Volumen desgastado vs Distancia de deslizamiento [10]

La presencia de FeTi, FeV y grafito en los electrodos para recubrimientos es justificada ya que precisamente el titanio y vanadio son elementos con gran capacidad para formar carburos duros e incrementando el contenido de grafito se puede apreciar un aumento significativo de la dureza; sin embargo tener contenidos de grafito por encima del 12 % propicia la generación de gran cantidad de cementita y ledeburita, lo cual nos da como resultado una matriz propensa a fisuraciones, por el contrario, si la cantidad de grafito está por debajo del 5% significa una menor capacidad de la microestructura para la formación de carburos aleados [10]; es por esto que según la literatura se puede concluir que el contenido inicial de grafito debería estar entre el 5 % y 12%.

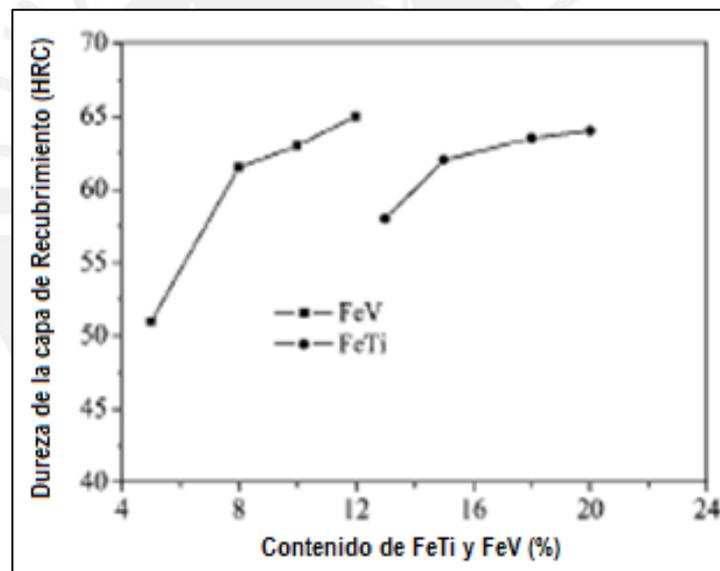


Figura 1-29 Relación que existe entre la dureza y el contenido de FeTi y FeV [10]

Adicionalmente al contenido de FeTi y FeV existe un factor adicional que tiene efecto sobre la dureza del recubrimiento. El número de capas depositadas en la pieza aumenta la dureza superficial de la capa externa (Figura 1-30) ya que cada capa adicional disminuye el efecto de la dilución y por tanto aumenta la composición efectiva de metal aportado a la superficie del recubrimiento.

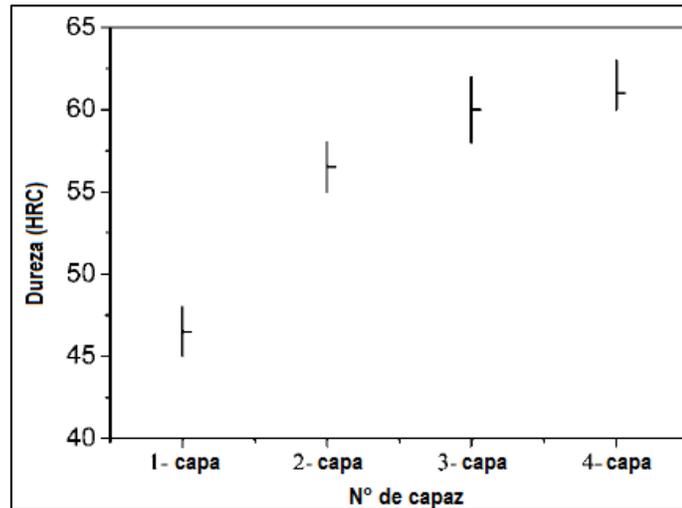


Figura 1-30 Dureza según el número de capas depositadas [10].

Para este caso en particular la dureza promedio de la primera capa está entre los 46.5 HRC, la segunda capa está entre los 56 HRC y la tercera capa está entre los 60.5 HRC, aunque la dureza promedio en la tercera capa es de 61 HRC a partir de las siguientes capas no se puede apreciar un aumento significativo de la dureza y por tanto realizar procedimientos adicionales de recargue solo incrementarían el costo y no los efectos antidesgaste; es por eso que es recomendable utilizar entre 2 y 3 capas de recargue para obtener el máximo valor de dureza del recargue.

Por otro lado; si bien es cierto que la presencia de carburos aumenta la resistencia al desgaste de una determinada microestructura, la forma y tamaño de los carburos presente en la matriz, contemplan comportamientos diferentes según las condiciones de desgaste a las que están sometidas; por ejemplo los resultados obtenidos por R.D. Govier [20] mostrados en la Tabla 1-3 nos indican diferentes designaciones de matrices con los mismos elementos aleantes, sin embargo las proporciones en las que se encuentran tienen efecto sobre el diámetro aproximado de las partículas y el tamaño de grano que generan, diámetros aproximados que están alrededor de las 8 micras además tienen una forma gruesa y angular, mientras que partículas de alrededor de 3 micras son pequeños y redondeadas con una distribución más uniforme en su matriz de granos finos.

Tabla 1-3 Relación del tamaño de las partículas de TiC con el tamaño de grano [20]

Designación	Contenido de TiC	Diámetro aproximado de TiC ( $\mu\text{m}$ )	Tamaño de grano
Ejemplar 1 - C	0.45	3.4	Grano fino
Ejemplar 2 - CM	0.45	3.1	Grano fino
Ejemplar 3 - CHW-45	0.45	3.2	Grano fino
Ejemplar 4 - SK	0.35	3.2	Grano fino
Ejemplar 5 - MS -5A	0.41	8.6	Grano grueso
Ejemplar 6 - PK	0.42	8.5	Grano grueso
Ejemplar 7 - HT-6A	0.40	7.9	Grano grueso

Los resultados de las pruebas de rayado expuestos en la Tabla 1-4 permitieron concluir que solo la dureza influye en el ancho de marca que deja el indentador duro, más no el tamaño ni la forma de la partícula de carburo, esto se debe principalmente a que el desgaste producido por una fuerza concentrada en la sección de indentación es mitigada solo por las partículas de carburos y no por el entrelazamiento de estas con la matriz.

Tabla 1-4. Relación de dureza con el ancho de huella al rayado [12]

Designación	Dureza HRC	Ancho de Rayado	Tamaño de grano
Ejemplar 1 - C	71	22.5 $\pm$ 0.4	Grano fino
Ejemplar 2 - CM	67	28.5 $\pm$ 1.2	Grano fino
Ejemplar 3 - CHW-45	61	33.3 $\pm$ 2.0	Grano fino
Ejemplar 4 - SK	62	32.2 $\pm$ 1.7	Grano fino
Ejemplar 5 - MS -5A	63	30.1 $\pm$ 0.8	Grano grueso
Ejemplar 6 - PK	67	28.6 $\pm$ 0.9	Grano grueso
Ejemplar 7 - HT-6A	54	39.4 $\pm$ 2.6	Grano grueso

Bajo la acción del ensayo denominado “pin-on drum” una probeta está sometida a severas condiciones de desgaste abrasivo; si bien es cierto las probetas reforzadas con carburos de titanio son muy resistentes a este tipo de desgaste y en general las microestructuras que poseen partículas finas tienen mejor comportamiento bajo estas condiciones, el tamaño y la forma de las partículas de carburo presentes en la microestructura influyen de manera particular en la relación que existe entre la dureza y la variación de la pérdida de volumen desgastado; en la Figura 1-31 se puede apreciar que existe un valor límite donde en función de la dureza, el comportamiento de las partículas gruesas frente al desgaste mitigará en mayor medida la pérdida de volumen desgastado con respecto a una microestructura de grano fino.

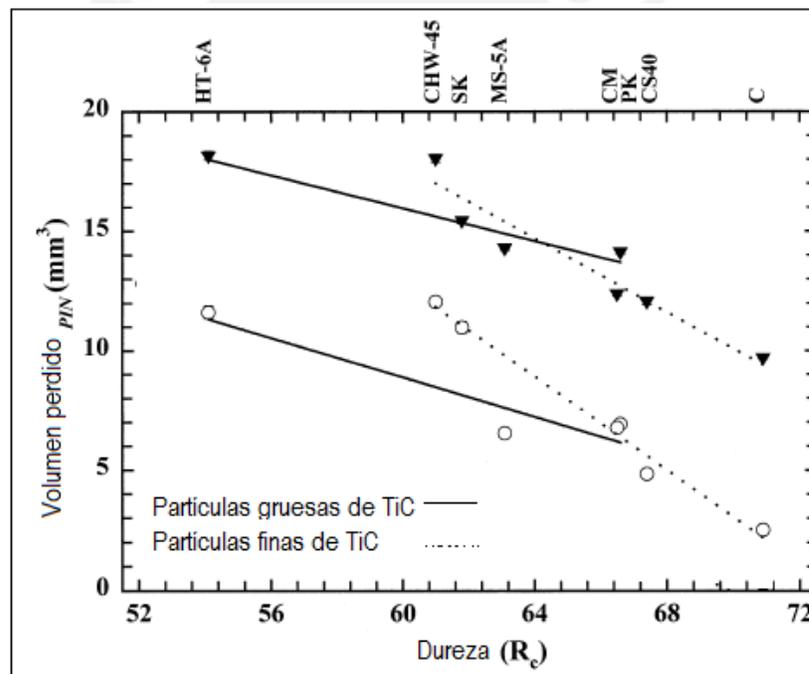


Figura 1-31. Dureza vs Volumen perdido en un ensayo de desgaste multidireccional (“pin on drum”) [20]

En un ensayo de bajos esfuerzo unidireccionales, normado según ASTM G65, al igual que en los otros ensayos la tendencia de pérdida de volumen desgastado es decreciente conforme la dureza del material aumenta y además se cumple rigurosamente que las

microestructuras con partículas más gruesas evidencian una mayor pérdida de material que las que contienen partículas de carburos más finas (Figura 1-32a). Esta tendencia también se cumple cuando las condiciones de desgaste incluyen impacto y abrasión simultáneamente. Las partículas finas uniformemente distribuidas tienen una mayor capacidad para absorber energía ya que el entrelazamiento con la matriz impide el desprendimiento brusco de material y la pérdida del mismo se realiza de manera lenta y con deformaciones progresivas formando “labios” hasta que finalmente se origina el desgaste (Figura 1-32b).

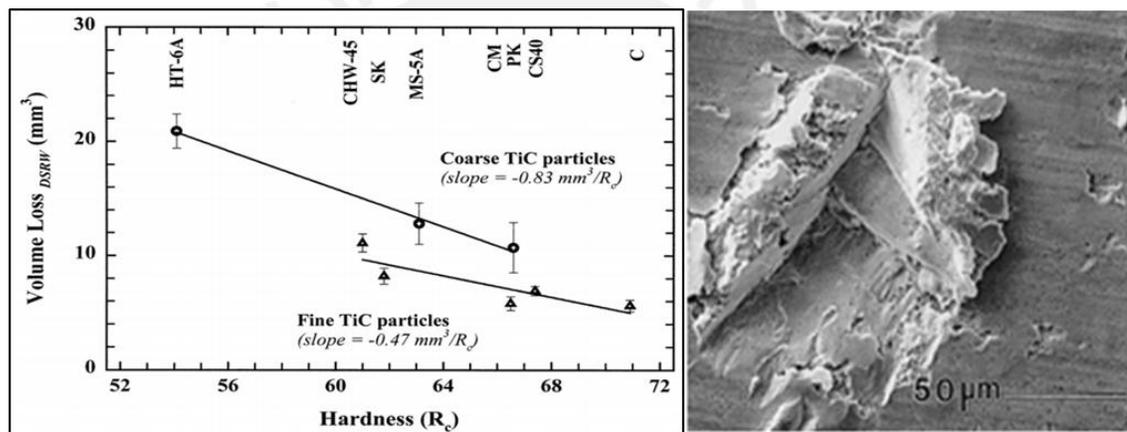
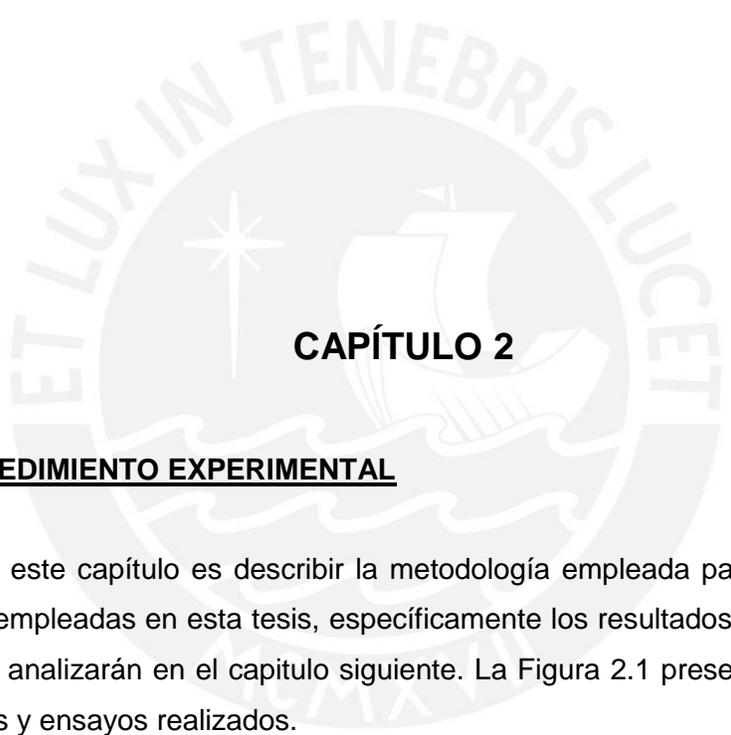


Figura 1-32. a.) Dureza vs Volumen perdido según ensayo ASTM G65; b.) Formación de “labios” y deformaciones progresivas que se desprenden del material [20]



## CAPÍTULO 2

### 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El objetivo de este capítulo es describir la metodología empleada para la evaluación de las muestras empleadas en esta tesis, específicamente los resultados de cada ensayo se presentarán y analizarán en el capítulo siguiente. La Figura 2.1 presente un esquema de las actividades y ensayos realizados.

Materiales y equipos empleados:

- Electrodo de recarga cuya composición se describe en la Tabla 2-1
- Fuente de poder para proceso SMAW y parámetros de soldeo (Tabla 2-2)
- Probetas de ensayo (3 probetas por cada serie a evaluar)
- Máquina de dureza Vickers (carga desde 1kg hasta 30 kg)
- Microscopio óptico de hasta mil aumentos
- Equipos de desbaste y set de lijas para preparación de muestras metalográficas
- Máquina de ensayo de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65

- Balanza con una precisión de 0.0001 gramos

Cada una de los ensayos se realizó íntegramente en el laboratorio de ingeniería de materiales de la PUCP y los pasos se describen a continuación:

- Fabricación y preparación de los cupones de soldadura a cargo de la empresa SOLDEXA S.A. Se agrupó en series (2.85, 3.85 y 5.85) según el elemento aleante a evaluar tal como se puede ver en la Tabla 2-1.
- Corte y mecanizado de las probetas a ensayar según ASTM G65; se tuvo tres probetas de cada uno de los cupones fabricados.
- A una muestra de cada serie se le realizó el análisis químico, la finalidad fue tener la composición química del depósito y que representa la composición química de la serie a evaluar. El análisis químico se hizo bajo la norma ASTM E415.
- A una muestra de cada serie se le realizó la preparación para el análisis metalográfico que muestre la microestructuras del depósito de soldadura. La preparación metalográfica se hizo según la norma ASTM E3.
- Se preparó la zona lateral de cada probeta y se hizo un barrido de dureza desde el metal base hasta el material depositado tal como se muestra en la figura 2-5, adicionalmente se preparo una zona superficial de cada probeta para registrar valores de dureza de la zona más superficial del depósito. El ensayo de dureza se realizó según la norma ASTM E384.
- A cada probeta se le realizó el ensayo de desgaste para obtener su resistencia al desgaste. El ensayo de desgaste se hizo según la norma ASTM G65.

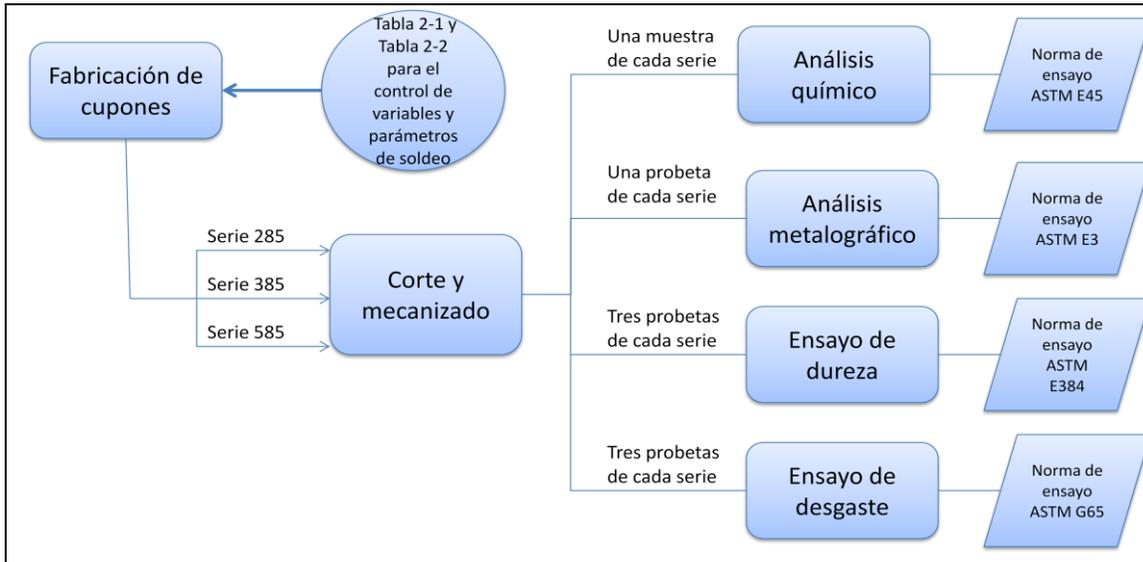


Figura 2-1 Esquema del procedimiento experimental

La fabricación de los electrodos se realizó controlando los elementos aleantes presentes en el revestimiento del electrodo, siendo la composición química, en especial el contenido de FeV y FeTi, la variable principal con la que se relacionó la resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos duros.

Los electrodos de recubrimiento fabricados para esta tesis contemplan la siguiente información:

Tabla 2-1 Composición del revestimiento de los electrodos empleados en los recargos ensayados



Composición de Electrodos			
Elementos	Serie 2.85	Serie 3.85	Serie 5.85
FeTi(45%)	5	5	5
FeV(80%)	2.85	3.85	5.85
Grafito	0	0	0

El siguiente paso fue realizar los depósitos de soldadura bajo los siguientes parámetros de soldeo:

Tabla 2-2 Parámetros de soldeo

Material Base	ASTM A36
Diámetro de electrodo	5.00 mm
Amperaje	180-190 A
T° Interpase	120-150 °C
Velocidad de Avance	3-4 cm/min
Polaridad	DCEP
N° Capas	3

La numeración de las series corresponde con el elemento de aleación que se está variando; se fabricaron cupones de soldadura con el recargue correspondiente al electrodo de cada serie para posteriormente ser maquinados. Se obtuvieron tres probetas por cada serie, teniendo un total de nueve probetas ensayadas; la dimensión final de cada una de ellas fue de 25 mm x 50 mm x 15 mm (ancho, largo y espesor), así como se muestra en la Figura 2-2. Rigurosamente según norma, las probetas debieron tener 25 x 76 mm de sección expuestas a desgaste y con un espesor de 3.2 a 12.7 mm; sin embargo la norma también contempla variantes en las dimensiones por alguna tipo de necesidad particular, en este caso el objetivo de este trabajo es evaluar el desgaste de las probetas en un estado original justo después del proceso de recargue por lo que solo fueron maquinados procurando que el ancho de la probeta corresponda con el alojamiento en la máquina de desgaste.

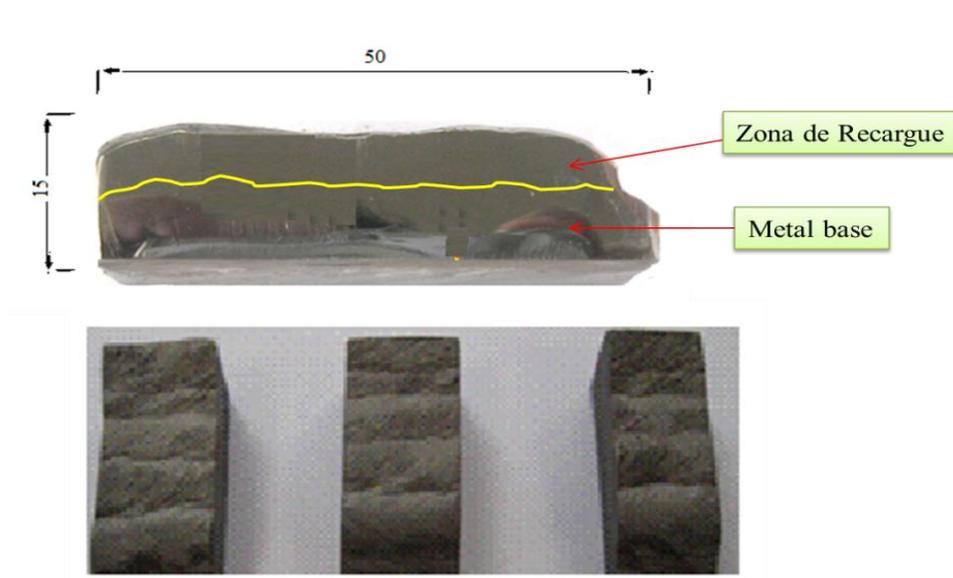


Figura 2-2 Dimensiones aproximadas de las probetas a ensayar

Finalmente cabe recalcar que este trabajo es un proyecto conjunto cuyos ensayos de desgaste se realizaron bajo las mismas condiciones y que los resultados de esta tesis junto con el aporte de los resultados obtenidos en otros trabajos (modificando el contenido de FeTi, FeV y grafito) permitirán realizar un análisis comparativo más amplio sobre los efectos del titanio, vanadio y grafito como elementos de aleación en electrodos que se utilizarán para recargues duros.

## 2.1 Ensayos de Caracterización:

### 2.1.1 Análisis químico (A.Q.):

Debido a que solo conocemos las cantidades iniciales de FeV, FeTi y de grafito utilizado para la fabricación de los electrodos, fue necesario realizar un análisis químico para conocer la composición del depósito de soldadura y que representa la composición química de la serie a evaluar. Se extrajeron pequeñas muestras (2 cm por 2cm) de cada serie a evaluar, la cuales fueron analizadas mediante espectrometría de emisión según la norma ASTM E415.

### 2.1.2 Procedimiento para el Análisis Metalográfico:

Se extrajeron muestras de cada serie para realizar el análisis metalográfico correspondiente. La preparación metalográfica se hizo según la norma ASTM E3 y se utilizaron los equipos mostrados en la Figura 2-3.

Las muestras se obtuvieron de secciones transversales a cada pase de recargue y contienen tanto el metal base como las respectivas capas de depósito de soldadura. La preparación metalográfica consistió en varias etapas:

- Corte y seccionamiento de la muestra
- Proceso de desbaste en papel abrasivo de carburo silicio de varias granulometrías
- Pulido empleando alúmina en suspensión con tamaño de partículas de 1  $\mu\text{m}$  y de 0,3  $\mu\text{m}$  respectivamente
- Ataque químico para revelar su microestructura empleando el reactivo Nital (solución de ácido nítrico en alcohol) al 5% y Cloruro Férrico según sea la zona de análisis

Finalmente para la obtención de las imágenes metalográficas se utilizó un microscopio óptico marca Leica modelo DCF 320 que posee cinco lentes y lograr aumentos de 50x, 100x, 200x, 500x y 1000x.

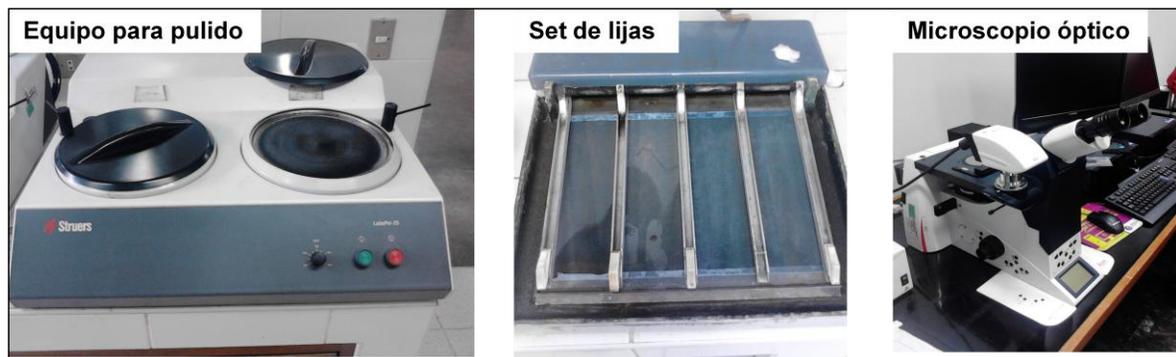


Figura 2-3 Equipos para la preparación y análisis metalográfico

### 2.1.3 Ensayos de Dureza:

Se efectuaron ensayos de dureza Vickers según la norma ASTM E384 en el Laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP. Para ello se empleó un durómetro Zwick Roell ZHV empleando una carga de 3 Kg tal como se muestra en la Figura 2-4.

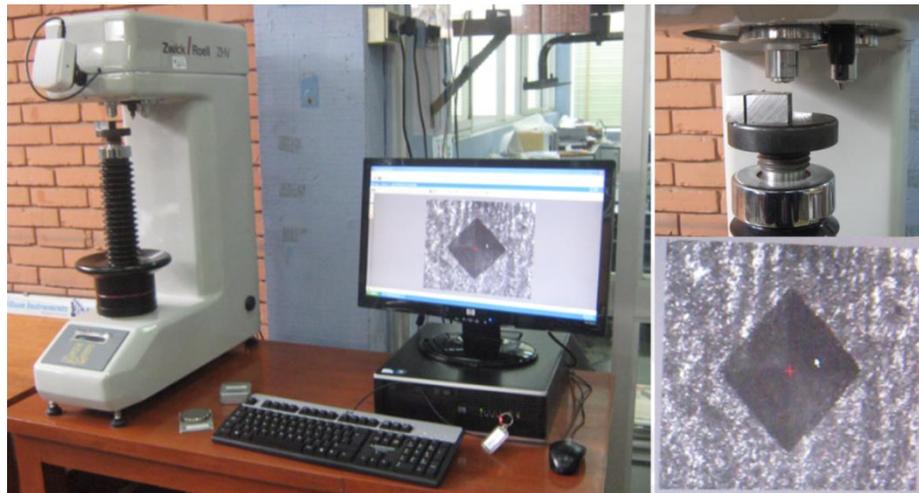


Figura 2-4 Durómetro Vickers y huella dejada por el indentador.

Las indentaciones se realizaron en puntos aleatorios de la superficie en contacto directo con las partículas abrasiva, y también se realizaron indentaciones en la sección transversal del recargue, tal como se muestra en la Figura 2-5. Adicionalmente se preparo una zona superficial de cada probeta para registrar valores de dureza de la zona más superficial del depósito.

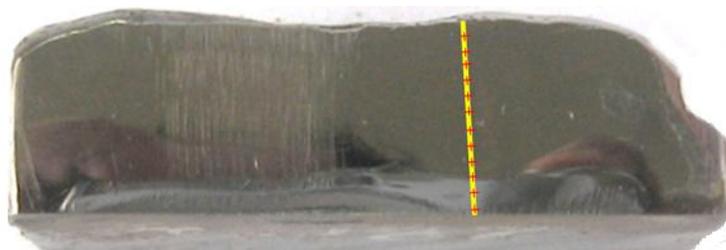


Figura 2-5 Esquema de barrido de dureza

## 2.2 Ensayos de Desgaste:

Antes de realizar el ensayo de desgaste se procedió a completar los siguientes pasos:

Selección de los parámetros de ensayo: debido a que el objetivo final de las prueba es una medición y comparación granulométrica de las probetas ensayadas, las condiciones de ensayo se deben mantener para las tres pruebas, fue necesario acondicionar la máquina de tal forma que garanticemos que el ensayo se realizó según la norma que lo rige.

El procedimiento de ensayo que se realizó se basa según la norma ASTM G65 tipo B y los parámetros que se consideraron son los siguientes:

Tabla 2-3 Parámetro de ensayo de desgaste abrasivo

Procedimiento	Carga sobre el cupón (N)	Revoluciones de la rueda (rpm)	Abrasión lineal (m)
<b>B</b>	<b>130</b>	<b>2000</b>	<b>1436</b>

Debido a que en la norma solo se menciona el número de revoluciones totales que debe realizar la rueda, el tiempo de ensayo se calculó según la velocidad de rotación de la máquina, se ensayaron las muestras por un periodo de 10 minutos.

El abrasivo que se utilizó fue arena fina seleccionada de tal forma que no existan impurezas como pequeñas rocas o partículas gruesas; según norma el flujo de arena debe estar entre 300 g/min hasta 400 g/min. En la Figura 2-6 se puede observar el flujo de arena entre la rueda de caucho y la probeta.

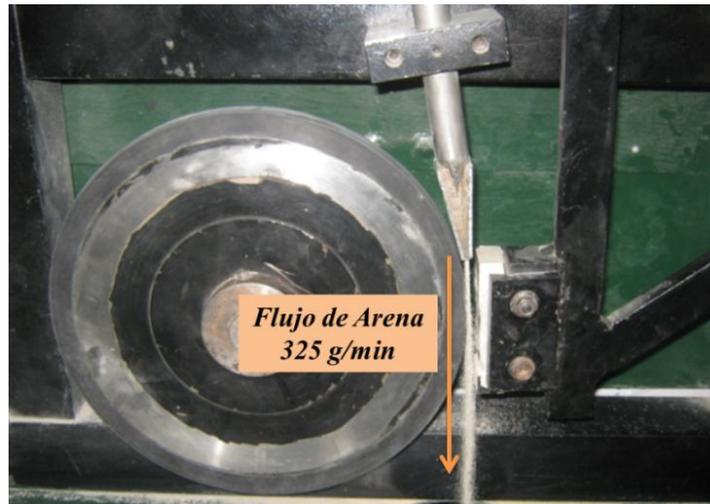


Figura 2-6 Partes del sistema tribológico: rueda, abrasivo y muestra.

La rueda de caucho: es el elemento motriz del ensayo ya que es el medio por el cual el agente abrasivo ocasiona el desgaste a la probeta, existe un contacto directo con la probeta a ensayar. Los márgenes de dureza de la rueda deben estar entre los 58 a 62 Shore A medida según la norma ASTM D 2240, así como se muestra en la Figura 2-7.



Figura 2-7 Toma de dureza Shore A del caucho de la rueda

Es natural que al ser un proceso de desgaste progresivo, se produzca pérdidas de material tanto para la rueda como para la probeta, es por eso que antes y después de cada ensayo se debe medir el diámetro de la rueda (Figura 2-8) y además garantizar el requerimiento de dureza antes mencionado. Un factor que influye en el comportamiento del caucho es la temperatura máxima de calentamiento que puede alcanzar, se debe asegurar que el calor generado por la fricción no sobrepase la temperatura de transición vítrea del material, el cual se encuentra alrededor de los 175°C, sobrepasar esta temperatura ocasionaría un comportamiento “dúctil” de este polímero y por ende un las mediciones no sería válidas para este trabajo.



Figura 2-8 Medición del diámetro de la rueda

Antes y después de cada ensayo se procedió a la limpieza de los cupones, sumergiéndolos en un baño de acetona en un recipiente ultrasónico (Figura 2-9) que nos permitirá eliminar impurezas o restos de partículas depositados en la superficie del cupón.



Figura 2-9. Cupones sometidos a una limpieza por ultrasonido en un baño de acetona

El registro de los datos se realizó tomando en cuenta las recomendaciones de un análisis de falla de una pieza que ha sufrido desgaste según “ASM Metal Handbook – Vol 11”

En la siguiente tabla se muestra la hoja de registro de datos que se utilizó al momento del ensayo de desgaste. Es importante tomar en cuenta la geometría inicial de la muestra, puesto que al realizarse un análisis experimental del desgaste de cupones en estado de recargue (sin mecanizado requerido por la norma ASTM G65), la morfología tiene un efecto sumamente relevante en la resistencia al desgaste, ya que si existe protuberancias o irregularidades en la zona de ensayo ocasionarán resultados que podrían distorsionar los resultados que se van a analizar.

Tabla 2-4 Hoja de registro de datos del ensayo de desgaste

<b>ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO</b>			
COMPAÑÍA:		FECHA:	
ANALISTA:		SERIE DE CUPONES:	
<b>PARÁMETROS DE ENSAYO DE LA MÁQUINA</b>			
VELOCIDAD DE LA RUEDA:			
TIEMPO DE ENSAYO:			
<b>DIMENSIONES DE LA PROBETA</b>			
<b>PROBETA Nr.</b>			
LARGO (mm)			
ANCHO (mm)			
ESPESOR (mm)			
AREA DE RECARGUE (mm)			
<b>DATOS DE ENSAYO</b>			
DUREZA DE LA RUEDA:			
DIÁMETROS DE LA RUEDA:			
<b>PROBETA Nr.</b>			
MASA INICIAL (g)			
MASA FINAL (g)			
PERDIDA DE MASA(g)			
DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )			
PERDIDA DE VOLUMEN (mm <sup>3</sup> )			
OBSERVACIONES:			



## CAPÍTULO 3

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez explicado el procedimiento de ensayos se realizó el estudio de los resultados obtenidos en cada ensayo para lo cual el marco teórico cumplió un papel sumamente importante.

Como primer paso se hizo el ensayo de desgaste, el cual se realizó bajo los parámetros de la norma ASTM G65, los resultados del ensayo de desgaste de la tabla 3-1 muestran cuantitativamente el peso inicial de las probetas ensayadas, la pérdida de masa en el ensayo y adicionalmente se introdujo el porcentaje de peso que se perdió con respecto al peso inicial de las probetas.

Tabla 3-1 Resultados del ensayo de desgaste

SERIE DE PROBETAS Nr. 585			
	585-1	585-2	585-3
MASA INICIAL (g)	178.6986	139.5704	133.0379
MASA FINAL (g)	178.1402	138.8086	132.5242
PÉRDIDA DE MASA (g)	<b>0.5584</b>	<b>0.5584</b>	<b>0.5137</b>
PÉRDIDA DE MASA %	<b>0.312</b>	<b>0.400</b>	<b>0.386</b>
PÉRDIDA DE MASA PROMEDIO(g)	<b>0.5435</b>		
SERIE DE PROBETAS Nr. 385			
	385-1	385-2	385-3
MASA INICIAL (g)	169.2412	133.4388	150.1055
MASA FINAL (g)	168.4771	132.4975	149.0363
PÉRDIDA DE MASA (g)	<b>0.7641</b>	<b>0.9413</b>	<b>1.0692</b>
PÉRDIDA DE MASA %	<b>0.451</b>	<b>0.705</b>	<b>0.712</b>
PÉRDIDA DE MASA PROMEDIO(g)	<b>0.9582</b>		
SERIE DE PROBETAS Nr. 285			
	285-1	285-2	285-3
MASA INICIAL (g)	126.0116	180.7826	142.7852
MASA FINAL (g)	124.8901	179.9655	141.5243
PÉRDIDA DE MASA (g)	<b>1.1215</b>	<b>0.8171</b>	<b>1.2609</b>
PÉRDIDA DE MASA %	<b>0.890</b>	<b>0.452</b>	<b>0.883</b>
PÉRDIDA DE MASA PROMEDIO(g)	<b>1.0665</b>		

Se puede observar que en algunos casos la pérdida de masa en porcentaje puede llegar a ser muy diferente a los resultados de los otros cupones de su misma serie debido a que el depósito de recargue no deja una misma superficie de contacto.

Con respecto a los valores de dureza registrados, en la Tabla 3-2 se presenta las mediciones de dureza desde el metal base (posición 1) hasta 2 mm por debajo de la superficie de la última capa de recargue (posición 12).

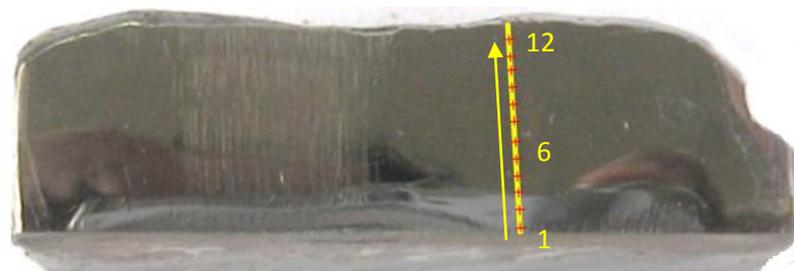


Tabla 3-2 Barrido de dureza

<b>Barrido de Microdureza Vickers</b>			
<b>Posición</b>	<b>Serie 285 HV-3kg</b>	<b>Serie 385 HV-3kg</b>	<b>Serie 585 HV-3kg</b>
1	144	156	173
2	152	169	165
3	163	170	168
4	164	170	169
5	163	172	161
6	543	522	506
7	591	609	608
8	608	564	614
9	593	639	558
10	524	624	632
11	585	609	626
12	596	651	684

Los resultados dureza representan un promedio de las tres probetas que corresponden a cada serie evaluada.

De la Tabla 3-2, en la Figura 3-1 se describen 3 zonas claramente identificables:

- Zona de metal base (aproximadamente 165 HV).
- Zona de dilución (entre 165 HV y 560 HV).
- Zona de recargue (entre 560 HV y 700 HV).

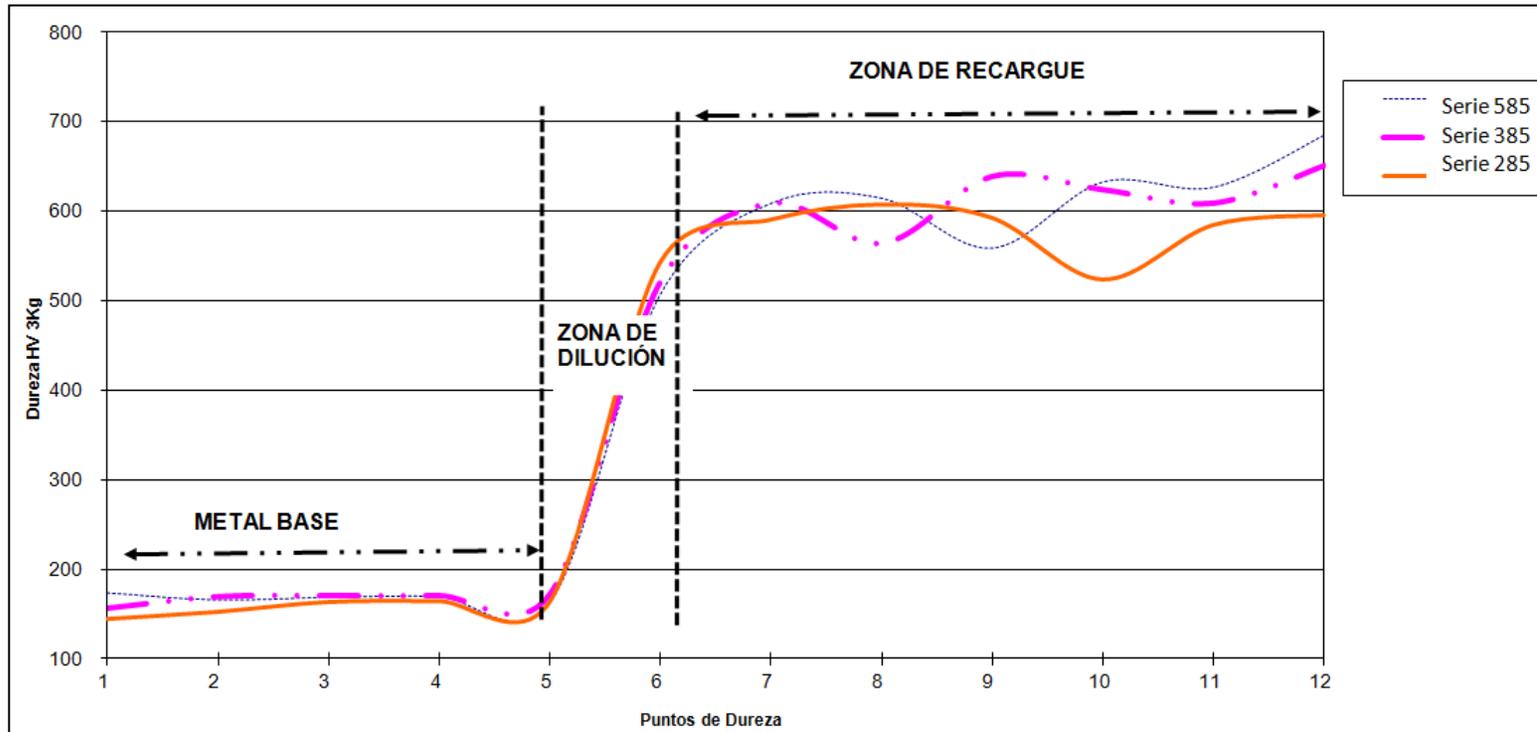


Figura 3-1. Barrido de dureza de las tres zonas para cada serie:

Metal Base, Zona de Dilución, Zona de Recargue.

Adicionalmente en la Tabla 3-3 se registró los datos de dureza de la superficie, ya que como se mencionó, en la Tabla 3-2 solo se muestra valores de dureza hasta 2 mm por debajo de la superficie.

Tabla 3-3 Dureza superficial de los depósitos de recargue

<b>Dureza Superficial de cupones de la Serie 285</b>			
<b>N° de indentacion</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>HV10</b>
1	166.9	169.2	657
2	173.8	170.6	625
3	171.1	167.8	646
4	172.5	170.1	632
5	166	167.4	668
6	174.3	170.1	625
7	171.1	176.2	615
<b>Dureza promedio</b>			<b>638</b>

<b>Dureza Superficial de cupones de la Serie 385</b>			
<b>N° de indentacion</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>HV10</b>
1	159.0	170.1	685
2	158.6	160.4	729
3	158.1	163.7	716
4	167.8	161.3	685
5	159.5	159.0	731
6	158.1	162.3	723
7	160.9	158.1	719
<b>Dureza promedio</b>			<b>712</b>

<b>Dureza Superficial de cupones de la Serie 585</b>			
<b>N° de indentacion</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>HV10</b>
1	159.5	159.0	731
2	156.7	158.6	746
3	161.8	152.1	753
4	159.0	161.8	721
5	158.6	153.9	760
6	160.9	163.7	704
7	156.2	159.0	744
<b>Dureza promedio</b>			<b>737</b>

Con los resultados de las tablas de dureza se puede apreciar claramente que la dureza de los cupones le corresponde la siguiente relación correspondiente a la Figura 3-2:

$$\text{Dureza serie 285} < \text{Dureza serie 385} < \text{Dureza serie 585}$$

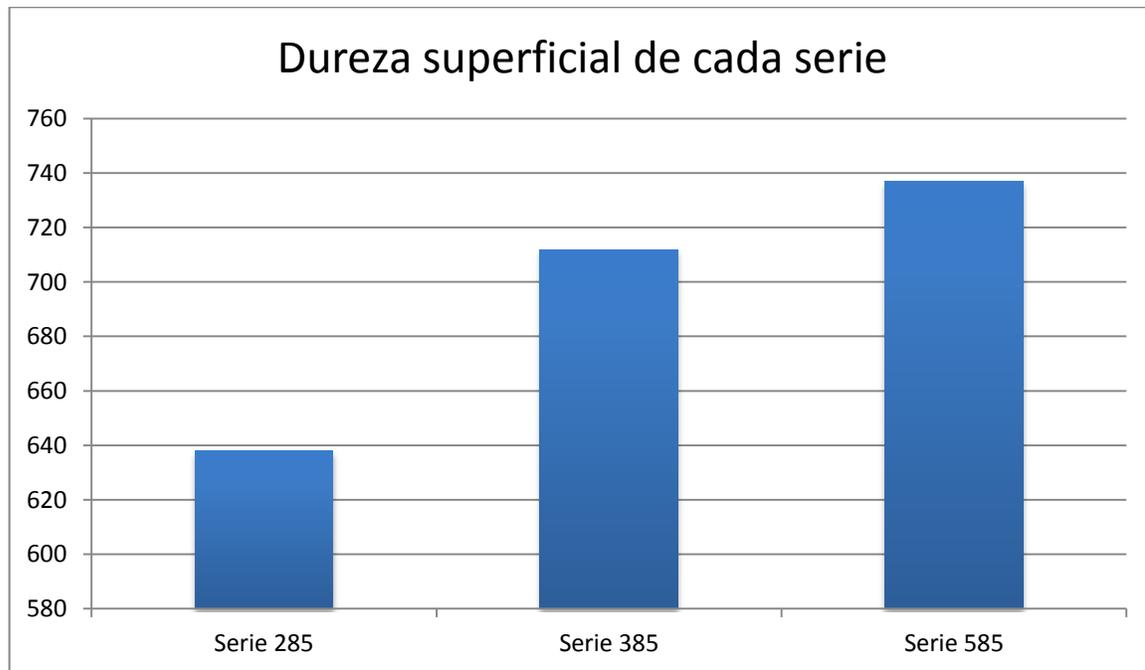


Figura 3-2. Representación de los valores de dureza de cada serie

Para el correspondiente análisis microestructural de las series a evaluar, fue necesario tener conocimiento de los resultados del análisis químico, en la Tabla 3-4 se presenta dichos resultados y adicionalmente en la Figura 3-3 se puede notar que conforme aumente el contenido de FeV en el electrodo de revestimiento se incrementa el contenido de V en el depósito de soldadura

Tabla 3-4 Composición Química de los recargos de soldadura

	C%	Si%	Mn%	Ni%	Cr%	Mo%	V%	W%	Ti%
<b>Serie 285</b>	0.578	0.859	2.099	0.043	6.165	0.396	0.115	0.005	0.054
<b>Serie 385</b>	0.632	0.953	2.150	0.045	6.721	0.430	1.080	0.001	0.067
<b>Serie 585</b>	0.596	0.876	2.044	0.043	6.183	0.404	2.116	0.000	0.068

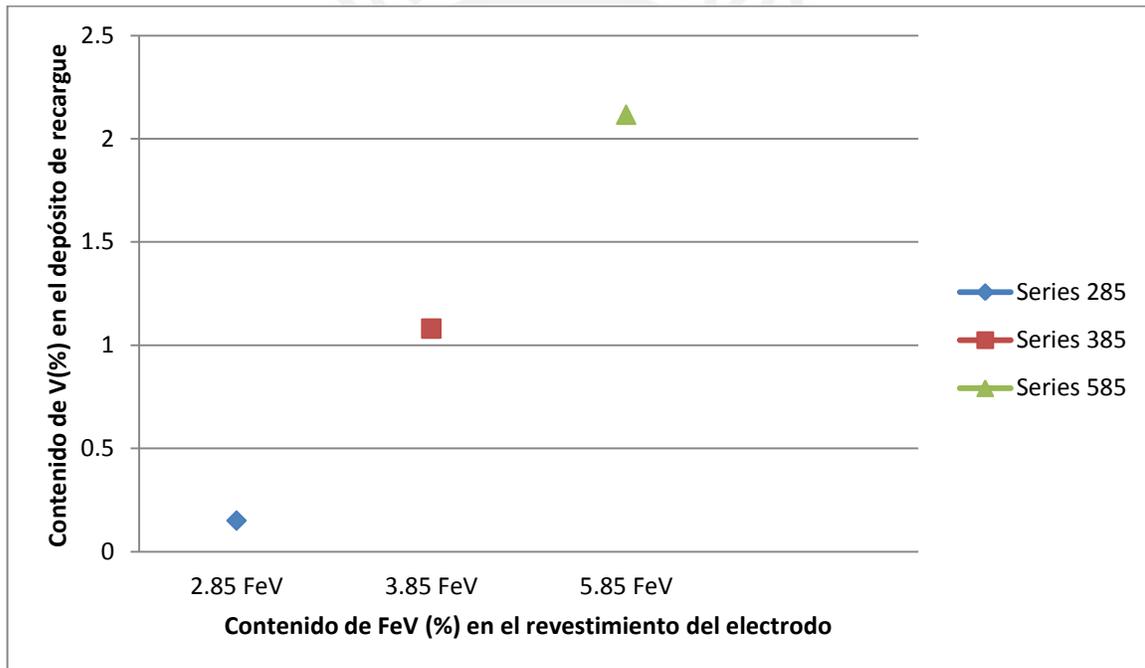


Figura 3-3. Relación del contenido de FeV(%) del revestimiento del electrodo con el contenido de V(%) en el depósito de recargue

Para predecir las posibles microestructuras del depósito de recargue expuestas en el Capítulo 1 se utilizó la Tabla 3-5 la cual agrupa el contenido de elementos aleantes (E.A) y el contenido de carbono (C) para posteriormente ser utilizada tal como se muestra en la Figura 3-4.

Tabla 3-5 Contenido de carbono y elementos aleantes de los depósitos de recargue

	Carbono (%)	E. Aleantes (%)
<b>Serie 285</b>	0.578	10.396
<b>Serie 385</b>	0.632	11.447
<b>Serie 585</b>	0.596	11.734

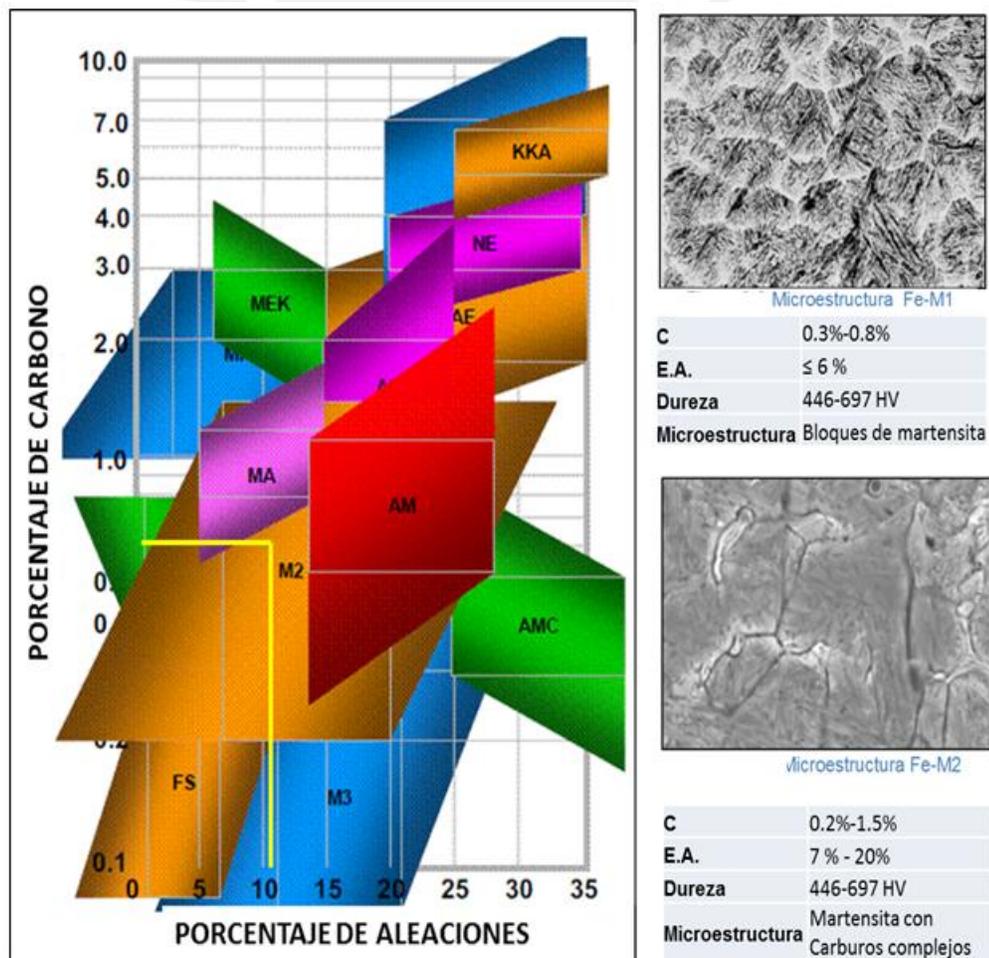


Figura 3-4 Posibles microestructuras según composición química

De la Figura. 3-4 se evidencia la presencia de martensita como microconstituyente principal del recargue; por tal motivo, en esa zona se encontró valores significativos de dureza, entre 450HV y 700 HV aproximadamente.

Teniendo una idea de las posibles microestructuras en el recargue se realizó el análisis metalográfico de las series a evaluar.

Como primer paso se procedió a identificar el metal base. En la Figura 3-5 se indica la ubicación de la zona de recargue y el material base de donde se obtuvo una pequeña muestra para el análisis metalográfico.



Figura 3-5 Muestras de material Base para metalografía

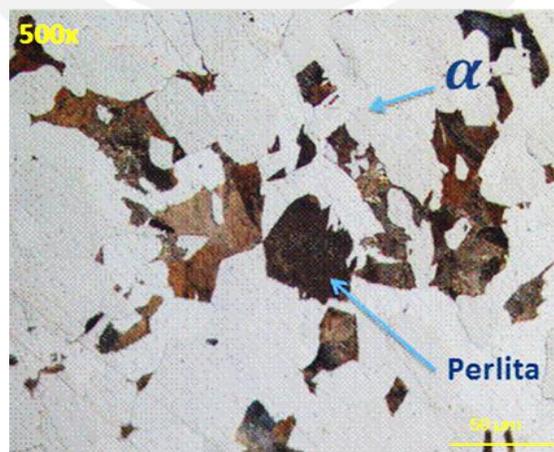


Figura 3-6 Metalografía de metal base

Claramente se puede identificar que el metal base es un acero de un mediano contenido de carbono, ya que de la Figura 3-6 la Perlita (zonas oscuras) se encuentra en menor proporción que la Ferrita  $\alpha$  (zonas claras).

Debido a que el recubrimiento se realizó por un proceso de soldadura; es importante para nuestro análisis conocer el número de capas de recargue, algo que fue establecido en los parámetros de soldeo de la Tabla 2-2, sin embargo con la ayuda de un análisis metalográfico como la que se muestra en la Figura 3-7 también es posible identificar las zonas de recargue y las variaciones microestructurales en el depósito total; excepcionalmente se usó el reactivo Picral, el cual es un reactivo coloreado que permite visualizar de manera global las diferentes capas de recargue que se depositó en el metal de prueba.



Figura 3-7 Identificación de las capas de recargue y las zonas afectadas por calor.

Básicamente la microestructura de las 3 zonas de recargue tienen la misma configuración metalográfica y en el análisis siguiente se observará de manera más detallada las metalografías correspondientes a cada serie ensayada.

### Metalografía de Serie de Cupones 285:

Se realizó un barrido metalográfico desde la parte superficial hasta el metal base tal como se esquematiza en la siguiente figura.

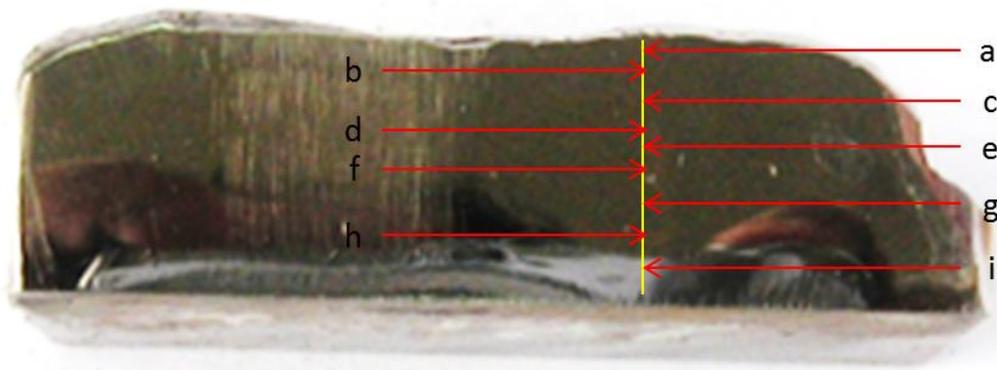


Figura 3-8 Esquema de barrido metalográfico de serie de cupones 285.

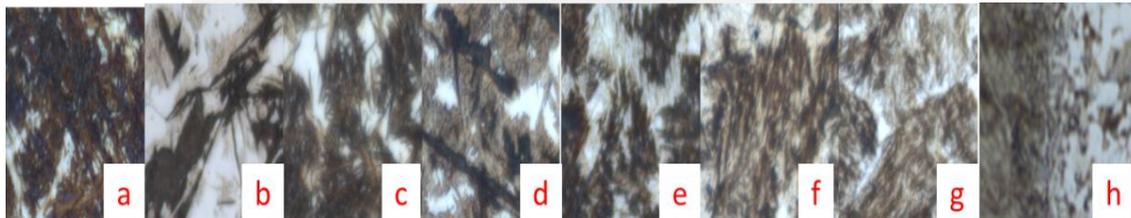


Figura 3-9 Barrido metalográfico de serie 285

En la Figura 3-9 se puede apreciar como el calor de aporte logra modificar la forma de los microconstituyentes presente en el recargue; esto es un efecto normal y propio de un proceso de depósito de material de aporte por soldeo.

En la Figura 3-10 se puede distinguir dos zonas con mucha claridad, fue necesario tomar un registro de la dureza de cada una de ellas para poder identificar los microconstituyentes.

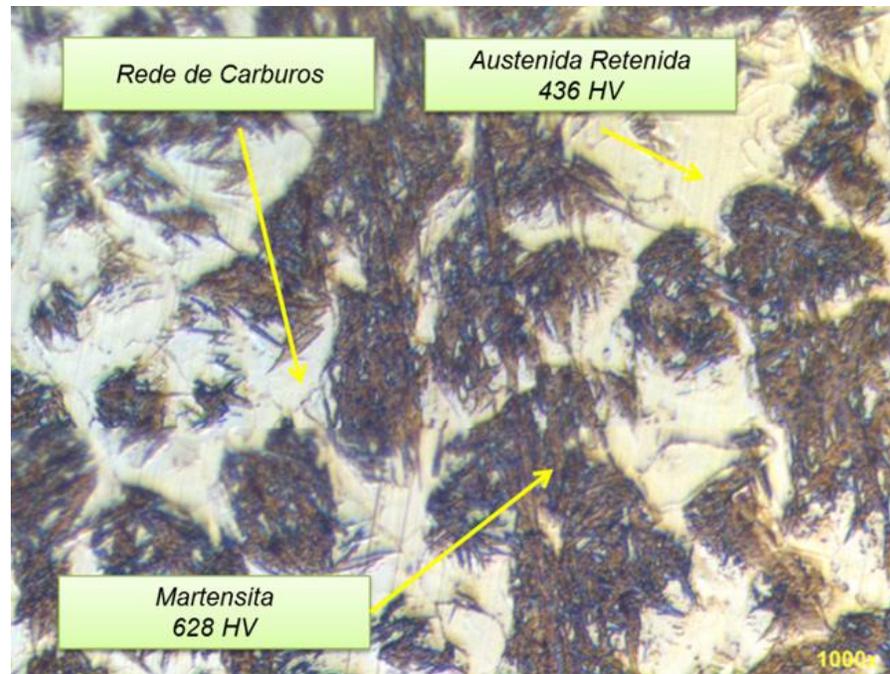


Figura 3-10 Metalografía a 1000x del punto “a” de la Figura 3-8.

Reactivo: Cloruro Férrico

Cotejando los valores de durezas de los microconstituyentes con la tabla 3-6 se presenta los siguientes resultados:

*Zonas oscurecidas:* Presencia de martensita de alto carbono, con una dureza de 628 HV.

*Zonas claras:* Es una indicación de austenita retenida con aleación de Cromo, con una dureza de 436 HV.

Tabla 3-6 Dureza de materiales más usados en hardfacing [2]

Material	Formula	Hardness HV
Ferrite	Alpha-Fe	70 – 200
Pearlite (nonalloyed)	Alpha Fe + Fe <sub>3</sub> C	250 – 320
Pearlite (alloyed)	Alpha Fe + Fe <sub>3</sub> C	300 – 460
Austenite Cr- alloyed	Gamma- Fe	300 – 600
Austenite low alloyed	Gamma- Fe	250 – 350
Nickel	Ni	560
Bainite	Alpha Fe + Fe <sub>3</sub> C	250 – 450
Martensite	Alpha Fe + Fe <sub>3</sub> C	500 – 1010
Cementite	Fe <sub>3</sub> C	840 – 1100
Chromium Carbide	Cr <sub>x</sub> C <sub>y</sub>	1330 – 1700
Titanium Nitride	TiN	1800
Tungsten Carbide	WC	1900 – 2000
Vanadium Carbide	VC	2300
Titanium Carbide	TiC	2500
Boron Carbide	B <sub>4</sub> C	2800

Además de las zonas que predominan en la Figura 3-10 se puede apreciar pequeños filamentos que forman el contorno de la austenita retenida, la presencia de alto contenido de aleaciones formadores de carburos tienden a crear redes de carburos en los límites de grano de la austenita.

Considerando que se identificaron los principales micronstuyentes en la estructura del recargue; las siguientes metalografías muestran cómo el calor de aporte afecta la estructura interna del recargue.

Conforme entramos en dirección del metal de aporte, existe una variación en cuanto a la morfología de la martensita. En la Figura 3-11 se puede observar la presencia de bloques de martensita acicular incrustadas en paquetes de martensita laminar, dentro de una matriz de austenita retenida con presencia de carburos en los límites de granos.

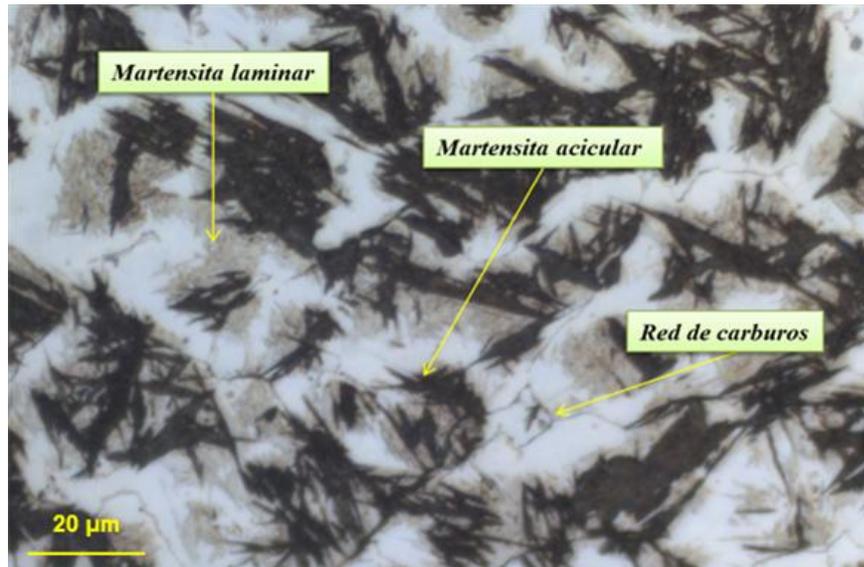


Figura 3-11 Metalografía a 1000x del punto “b” de la Figura 3-8.

Reactivo: Cloruro Férrico

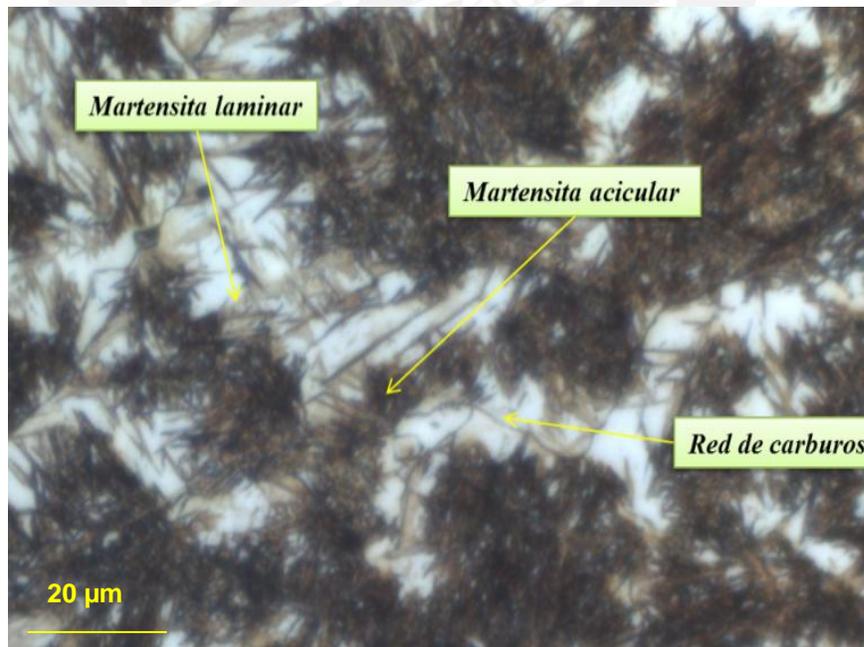


Figura 3-12 Metalografía a 1000x de punto “c” de la Figura 3-8.

Reactivo: Cloruro Férrico



En la Figura 3-14 se observa disminución de la fase austenita y al igual que en los otros casos se puede apreciar la martensita laminar y acicular, sin embargo se presenta aproximadamente en la misma proporción; es probable que las zonas oscura redondeadas en los paquetes de martensita acicular sea una indicación de la posible presencia combinada de martensita con bainita o perlita.

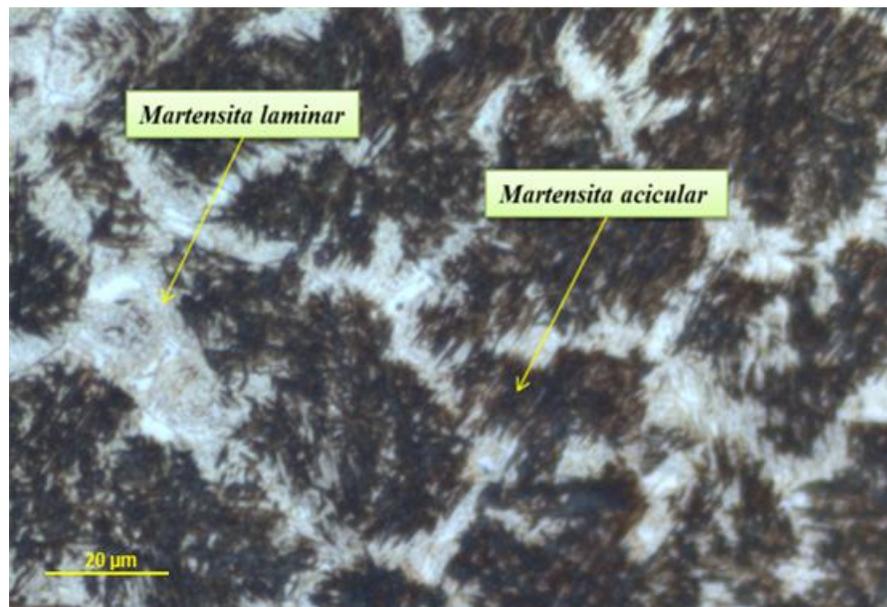


Figura 3-14 Metalografía a 1000x del punto “e” de la Figura 3-8.

Reactivo: Cloruro Férrico

En la Figura 3-15 se observa láminas de martensita revenida y a medida que vamos introduciéndonos a la primera capa de recubrimiento, se observa una considerable disminución de la fase austenítica.

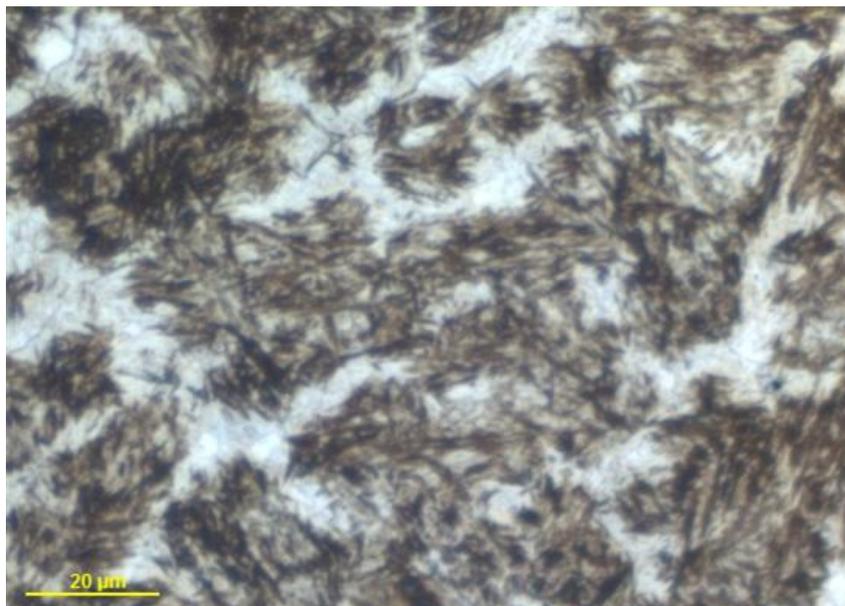


Figura 3-15 Metalografía a 1000x del punto “f” de la Figura 3-8.

Reactivo: Cloruro Férrico

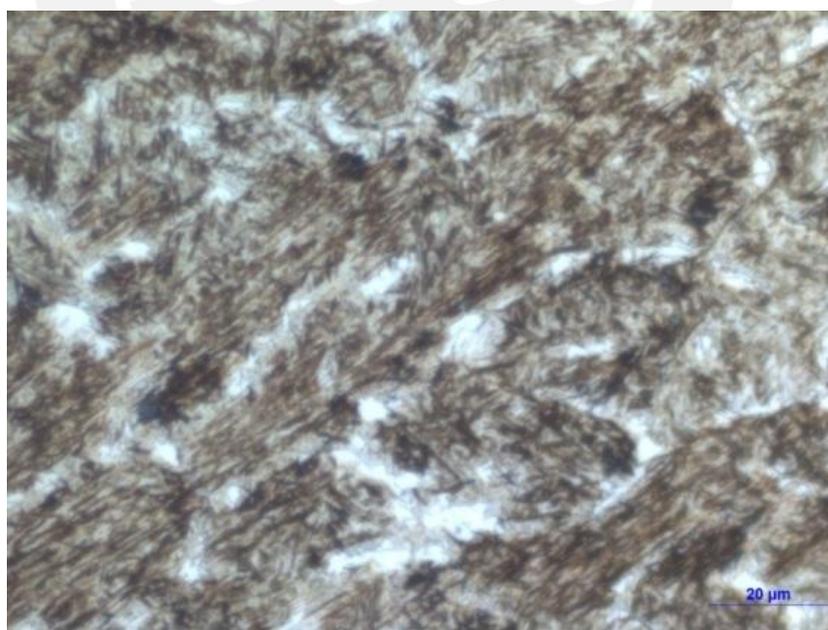


Figura 3-16 Metalografía punto “g” de la Figura 3-8.

Reactivo: Cloruro Férrico

En la Figura 3-16 nos ubicamos en la zona límite con el material base, existe una predominancia de bloques de martensita revenida y poca presencia de austenita retenida, probablemente se produjo difusión del hierro en la matriz.

En la Figura 3-17 se puede apreciar claramente la diferencia entre el metal base y el depósito de recubrimiento.

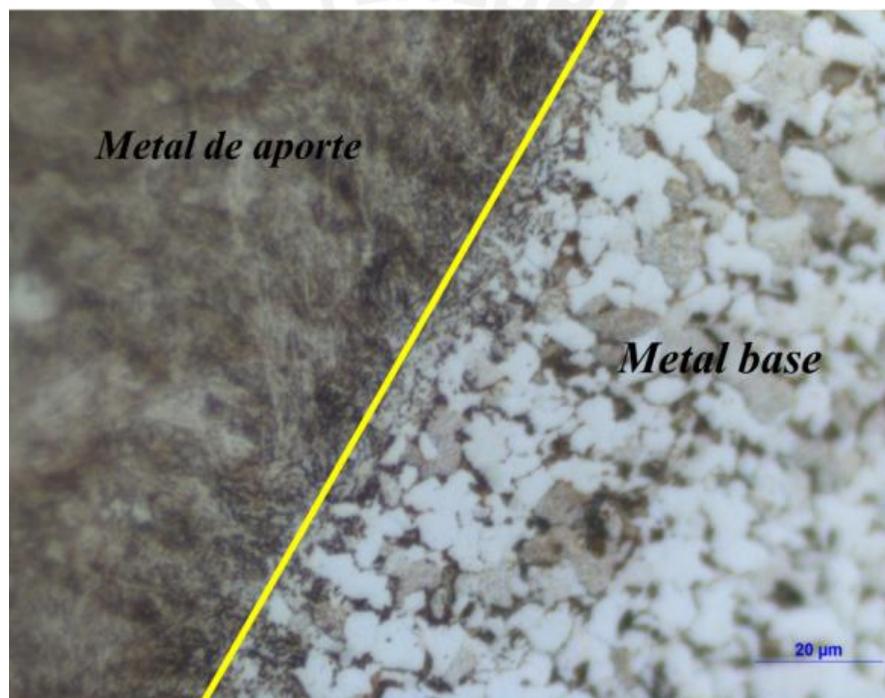


Figura 3-17 Metalografía punto “h” de la Figura 3-8.

Reactivo: Cloruro Férrico

En los siguientes casos, es decir para la serie de cupones 385 y 585, solo se presentarán de manera detallada la metalografía de las zonas más superficiales debido a que estas son las que están sometidas a desgaste y por ende es tema de interés de esta tesis aunque de igual manera se presenta el barrido metalográfico que corresponde a dicho cupón.

Metalografía de Serie de Cupones 385:

Bajo el esquema de la Figura 3-8 se realizó el barrido metalográfico de una muestra de la serie de cupones 385.



Figura 3-18 Barrido metalográfico de serie de cupones

Reactivo: cloruro férrico.

De las Figuras 3-19 se pueden observar claramente la evidencia de martensita (zonas oscura), en la Figura 3-19a se aprecia la martensita en forma de paquetes alargados con alto contenido de carbono e incrustaciones de carburos, no se puede observar claramente los filamentos de carburo pero tampoco podemos descartar su presencia, es de notar que conforme ingresamos al recargue en la Figura 3-19b se puede apreciar que la martensita pasa a formar una estructura acicular, esto es evidencia de la influencia que tiene la velocidad de enfriamiento y el calor en la forma de la martensita en una respectiva microestructura.

En ambas imágenes se puede apreciar una matriz de austenita retenida (zonas claras) con presencia de filamentos que parecieran estar en los límites de granos, debido a la composición química y a comparaciones con estructuras similares es una clara indicación de la presencia de redes de carburos en la matriz austenítica.

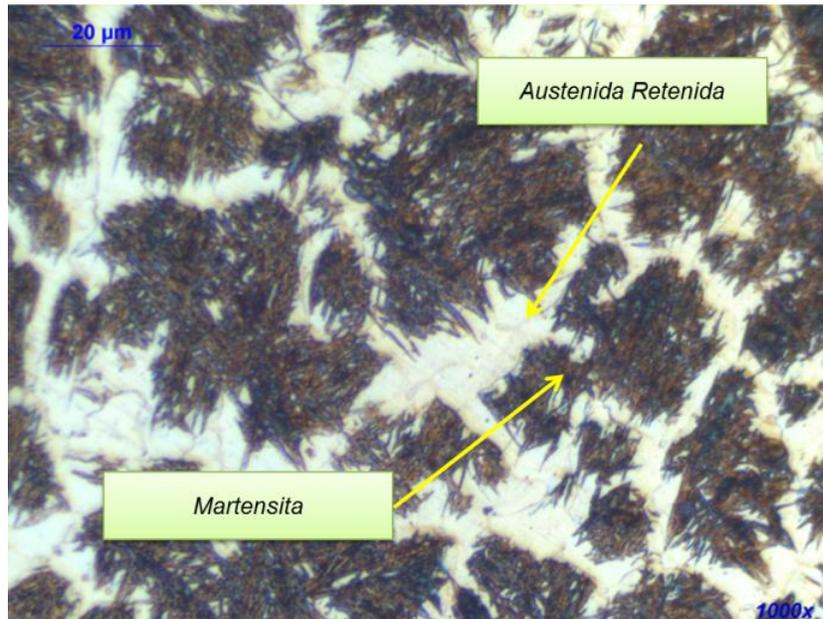


Figura 3-19a. Microestructura a 1000x de la superficie de la serie 385.

Reactivo: Cloruro Férrico

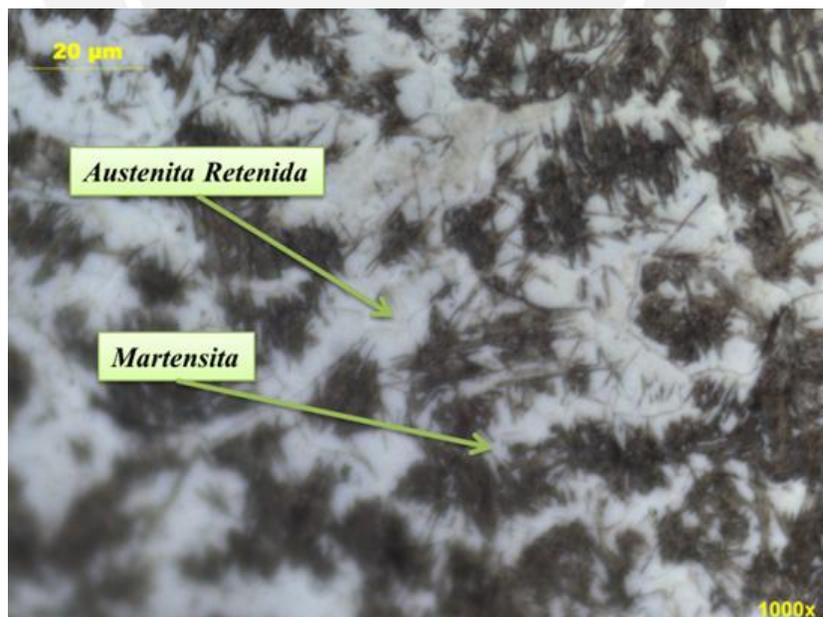


Figura 3-19b. Microestructura a 1000x de las zonas continúa al de la Figura 3-19a.

Reactivo: Cloruro Férrico

Metalografía de Serie de Cupones 585:

Al igual que en los casos anteriores el barrido metalográfico (Figura 3-20) muestra las siguientes microestructuras.

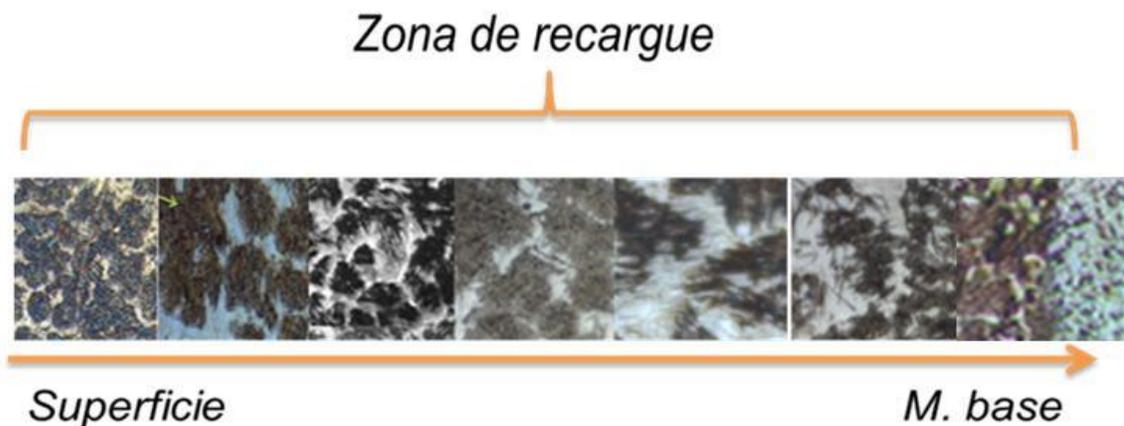


Figura 3-20 Barrido metalográfico de serie de cupones 284.

Reactivo: Cloruro Férrico

En la Figura 3-21a podemos observar cómo se encuentra la martensita en la capa más superficial, en comparación con las otras series de cupones, el alto contenido de elementos formadores de carburos hace pensar que los paquetes redondeados y muy bien distribuidos en la matriz contienen incrustaciones de carburos, lo cual se podría demostrar posteriormente con un ensayo de difracción de rayos X. Conforme ingresamos al recargue la martensita se torna acicular con presencia de pequeñas redes de carburos en la matriz de austenita.

Al igual que en la metalografía de la parte superficial de la muestra de la serie 385, en la imagen de la derecha de la Figura 3-21b no se puede apreciar con claridad la existencia de redes de carburos en la matriz de austenita, pero conforme nos introducimos al interior del recargue si se aprecian nuevamente.

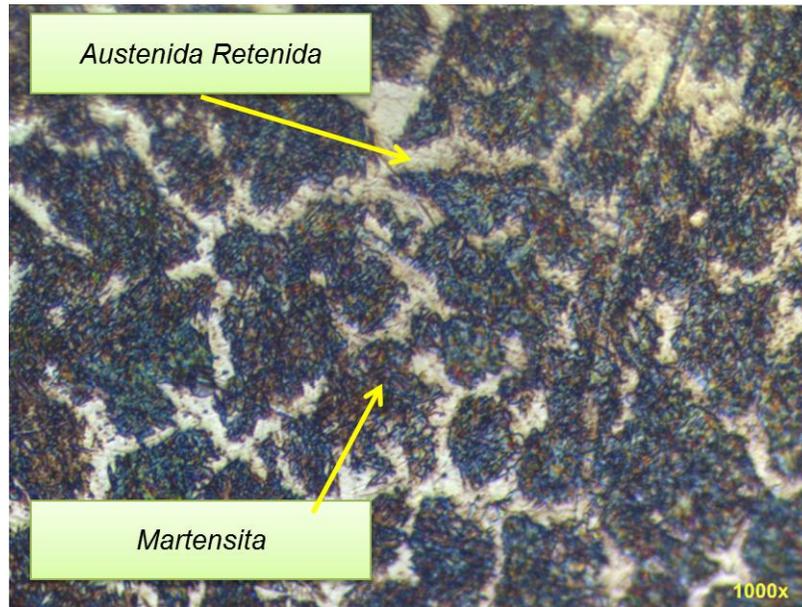


Figura 3-21a. Microestructura a 1000x de la superficie de la serie 585.

Reactivo: Cloruro Férrico

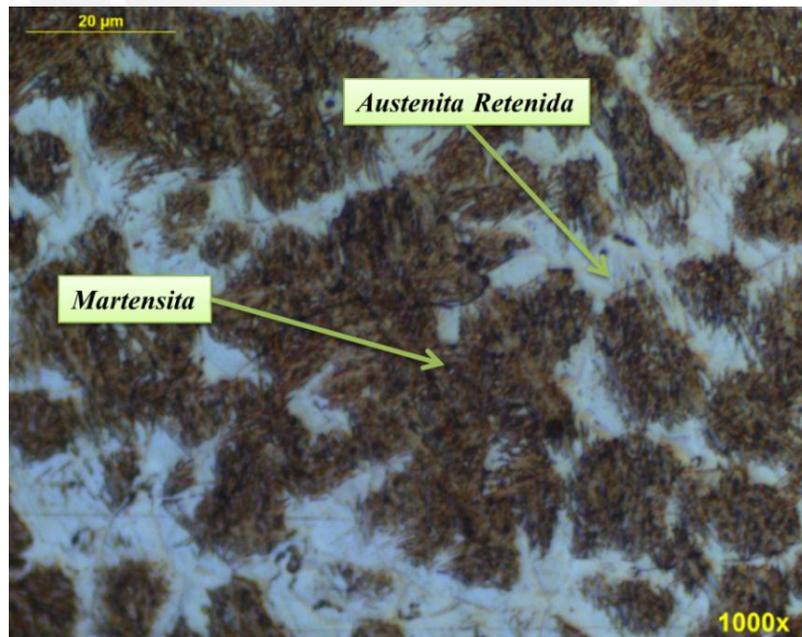


Figura 3-21b Microestructura a 1000x de las zonas continúa al de la Figura 3-21a.

Reactivo: Cloruro Férrico

Ya que en el ensayo de desgaste por abrasión el efecto que tiene la última capa de recargue marca la diferencia en la resistencia, es de esperarse que las microestructuras también sean diferentes.

En la Figura 3-22 se puede las diferencias que existen entre las microestructuras más cercanas a la superficie de los cupones evaluados.

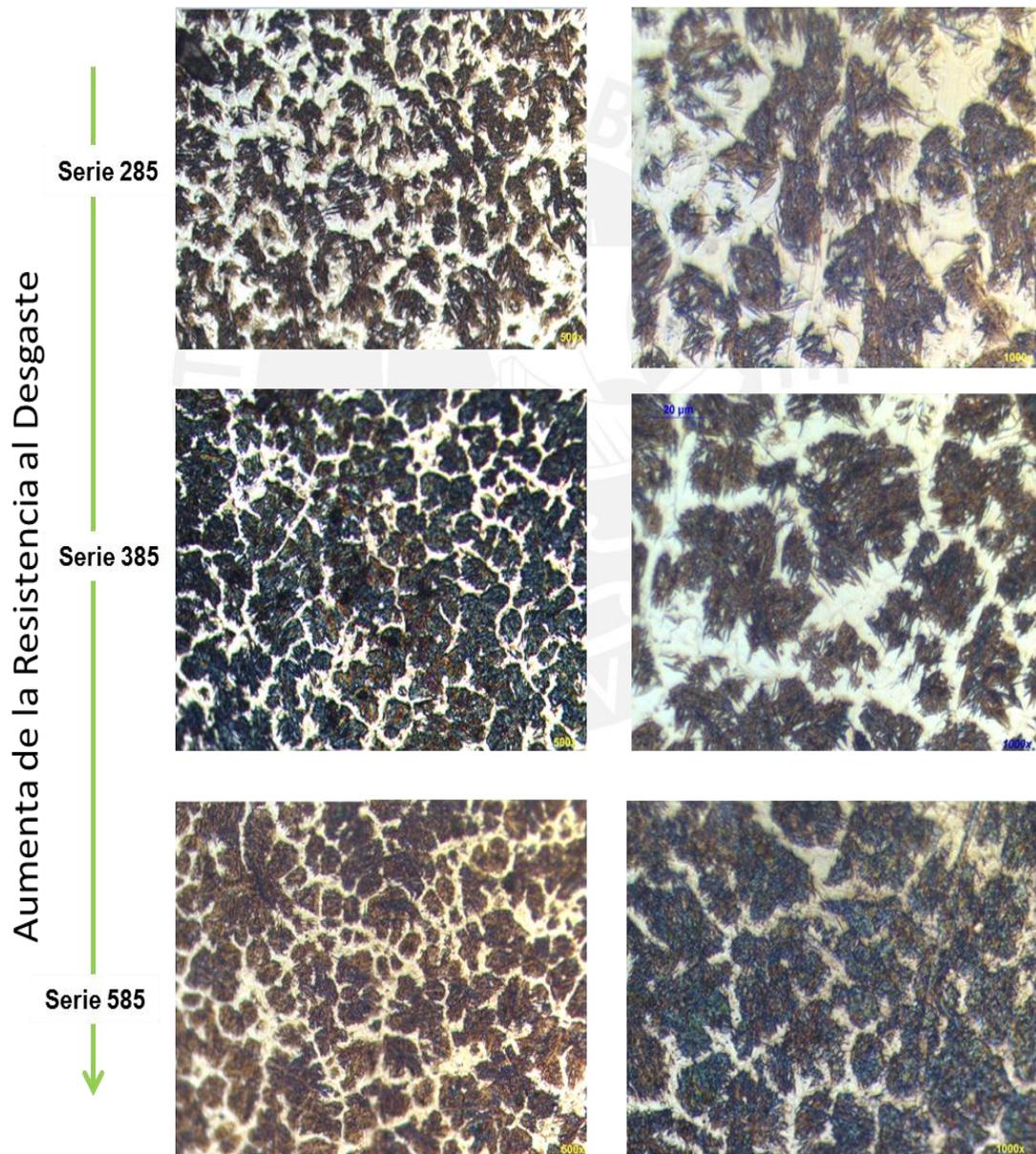


Figura 3-22 Metalografías a 500x (izquierda) --- Metalografías a 1000x (derecha)

La metalografía superficial de la serie 285 presenta una gran cantidad de austenita retenida (zonas claras) en comparación con la metalografía de la serie 585, lo cual explica su menor comportamiento antidesgaste.

En las metalografías de las series 385 y 585 se puede notar la formación de paquetes de martensita de alto carbono con posible presencia de carburos disueltos, pero en la serie 585 el contenido de martensita es mucho mayor que la austenita retenida.

Además de la microestructura se procedió a comparar los valores de dureza con la pérdida de masa del ensayo de desgaste.

Con respecto a los valores de dureza, para simplificar las comparaciones y garantizar que se tomó valores representativos, se utilizó el valor promedio de dureza de la superficie del depósito (Tabla 3-2) con las durezas de los últimos 3 puntos de la sección transversal de cada cupón (Tabla 3-3).

Con respecto a los resultados del ensayo de desgaste se utilizó la información de la Tabla 3-1.

Se sintetizaron los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 3-7 Síntesis de resultados de Dureza y Pérdida de masa

	<b>Dureza Promedio (HV)</b>	<b>Pérdida de Masa (%)</b>	<b>Pérdida de Masa (g)</b>
<b>Serie 285</b>	585	0.742	1.0665
<b>Serie 385</b>	649	0.623	0.9582
<b>Serie 585</b>	670	0.366	0.5435

De la Figura 3-23 se puede observar una clara tendencia, conforme se incrementa la dureza del recubrimiento de soldadura existe una menor pérdida de masa en la superficie, si comparamos el intervalo entre la serie 285 y 385 con el intervalo de la serie 385 y 585, podemos establecer al igual que *R.D. Govier* [6] que para valores de dureza del recubrimiento que están por encima de los 60 HRC o que viene a ser su equivalente a 600 HV, se puede apreciar una mayor influencia de la dureza en la atenuación del desgaste.

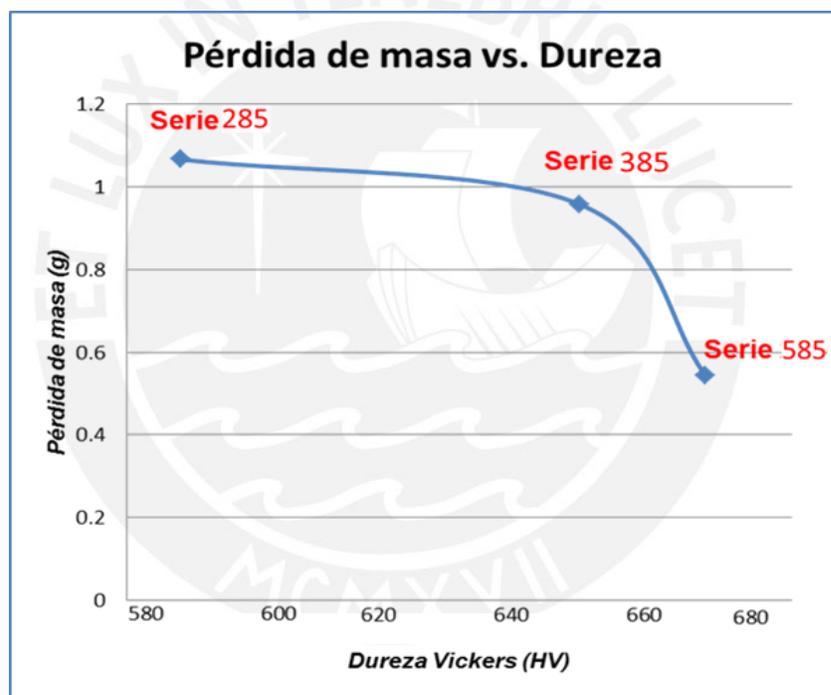
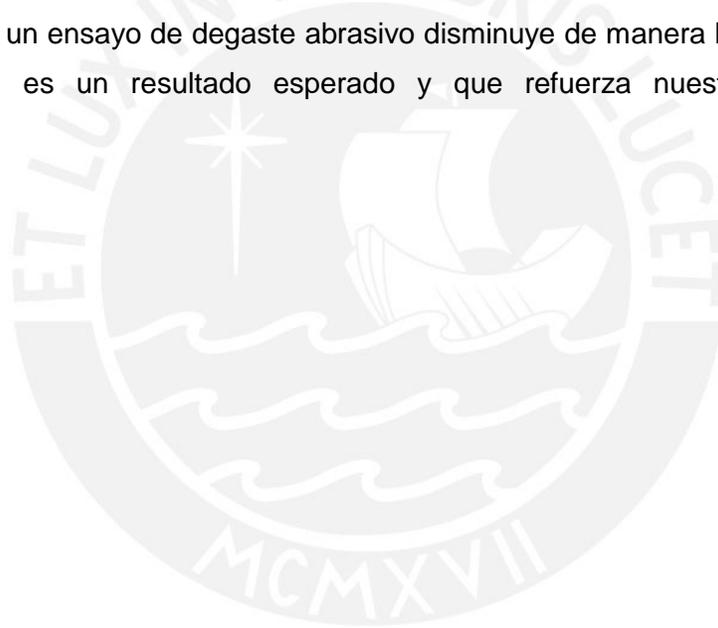


Figura 3-23 Pérdida de masa vs. Dureza Promedio

Por otro lado es importante mencionar que el resultado depende en gran medida de los parámetros de soldeo tales como la tasa de solidificación, el gradiente de temperatura en estado líquido o la temperatura de enfriamiento, sin embargo estos parámetros fueron controlados de tal forma que la única variable a evaluar sea la composición química.

En la Figura 3-24 se muestra el efecto de la composición química sobre los valores de dureza y resistencia al desgaste.

Se puede apreciar claramente que conforme se aumenta el contenido de FeV en el electrodo de revestimiento, se puede apreciar un notorio aumento de la dureza de la última capa de recargue, para un contenido de 2.85 %, 3.85% y 5.85% de FeV, la última capa de recargue tiene una dureza promedio de 586 HV, 649 HV y 670 HV respectivamente, esta relación se puede aproximar a una curva cuadrática cuya tendencia de puntos tiene un buen ajuste a la curva, se puede notar que con contenidos de FeV por encima del 6% no presentaría un aumento significativo de dureza. Por otro lado la pérdida de masa bajo un ensayo de desgaste abrasivo disminuye de manera lineal al contenido de FeV, lo cual es un resultado esperado y que refuerza nuestra hipótesis inicial.



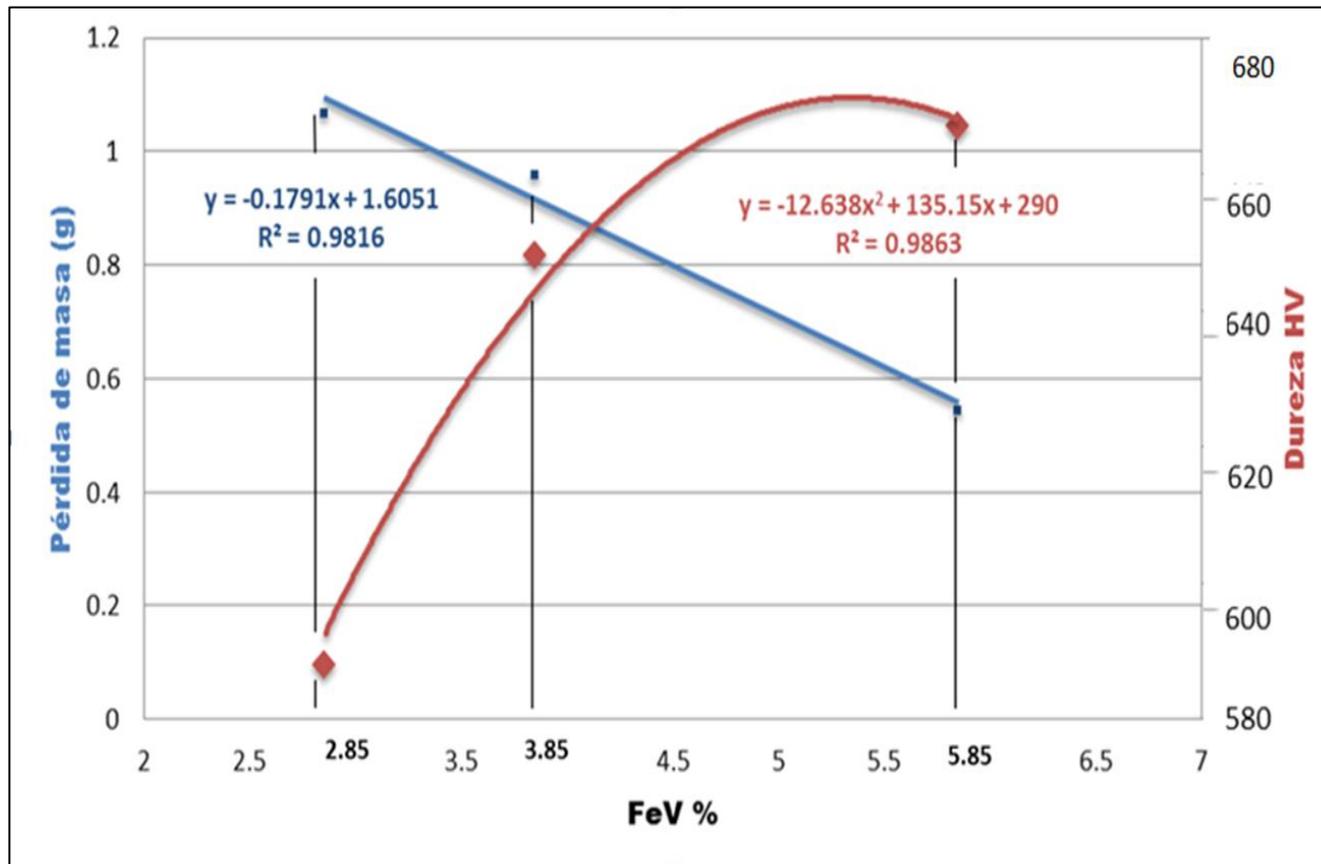


Figura 3-24 Relación de Dureza y Pérdida de masa según el contenido de FeV en el electrodo de recubrimiento.

Comparaciones con resultados de investigaciones anteriores:

Debido a que investigaciones anteriores reportan sus resultados de desgaste en función de volumen desgastado de la muestra, se utilizó la densidad del acero para poder comparar los resultados de esta tesis. En la Tabla 3-8 se puede apreciar los resultados del ensayo de desgaste de cada serie evaluada.

Tabla 3-8 Resultados del ensayo de desgaste y dureza

Parámetros de comparación	Serie 285	Serie 385	Serie 585
Contenido de FeV (%)	2.85	3.85	5.85
Masa desgastada (g)	1.0665	0.9582	0.5435
Volumen desgastado (mm <sup>3</sup> )*	130.36	124.31	71.46
Volumen desgastado (mm <sup>3</sup> /m)**	0.091	0.087	0.050
Dureza HV	586	649	670
*Se tomó como densidad del material desgastado la densidad del acero (7.89g/cm <sup>3</sup> )			
**Volumen desgastado(mm <sup>3</sup> ) para una distancia recorrida de la rueda de caucho de 1436m (tabla 2-4)			

De manera gráfica la relación de volumen desgastado con el contenido de FeV se presenta en la Figura 3-25. Se puede apreciar que conforme aumenta el contenido de FeV en el electrodo de soldadura, la pérdida de volumen disminuye; esto se debe a que el aumento del contenido de vanadio fomenta la formación de microestructuras más duras y por lo tanto más resistentes al desgaste.

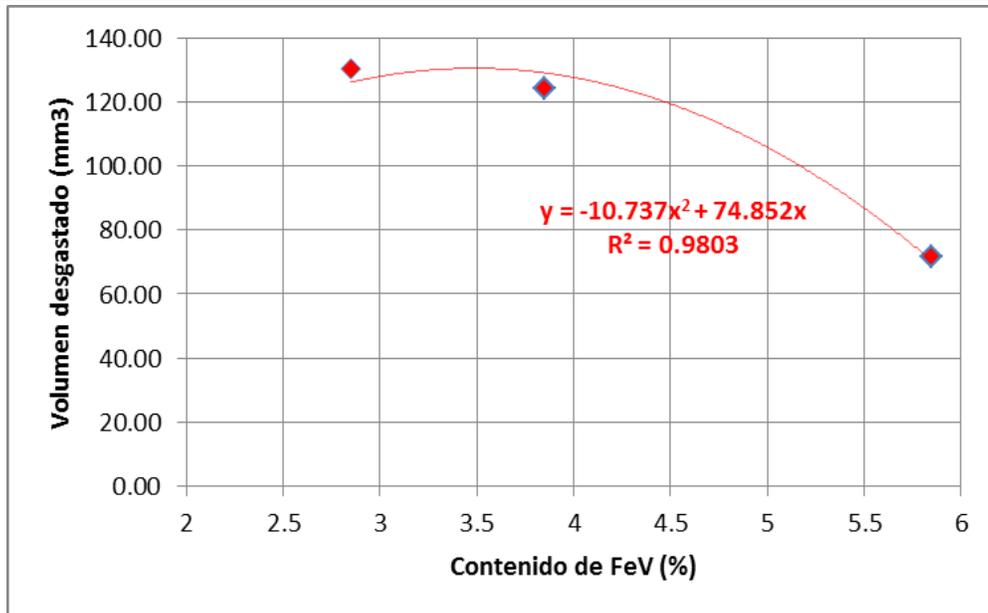


Figura 3-25 Relación de volumen desgastado vs. Contenido de FeV.

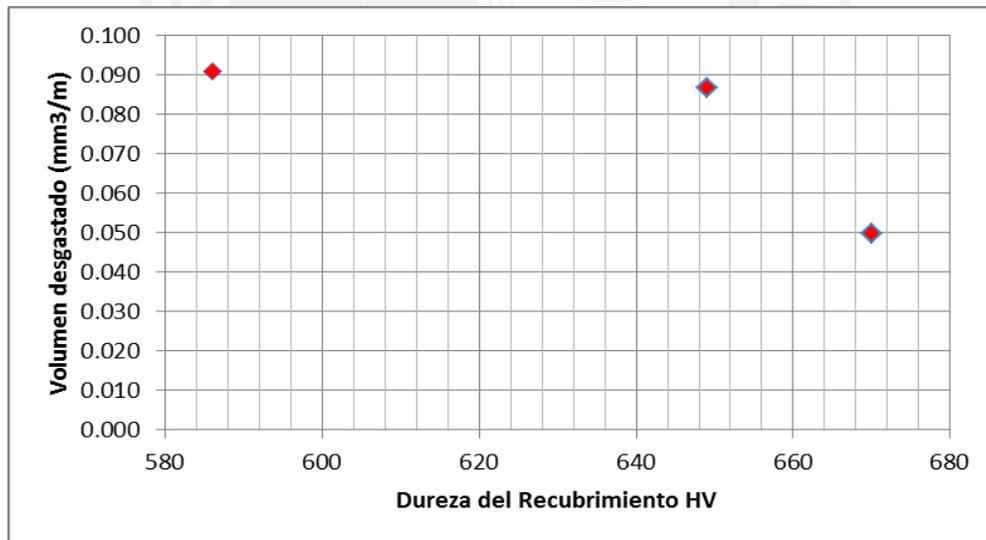


Figura 3-26 Relación de volumen desgastado (mm<sup>3</sup>) vs. Dureza del recargue HV.

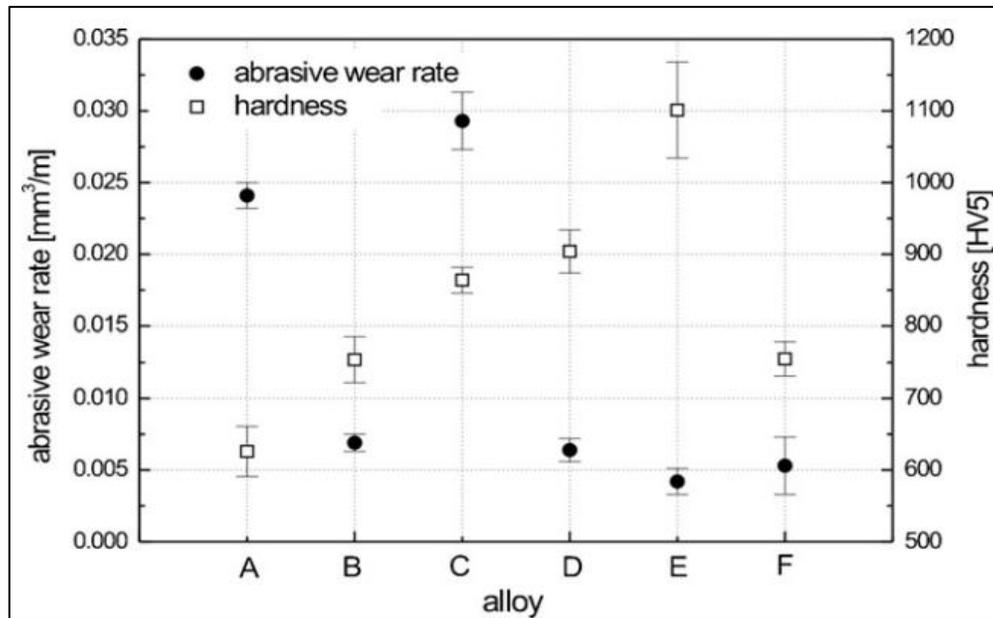


Figura 3-27 Relación de volumen desgastado ( $\text{mm}^3/\text{m}$ ) vs. Dureza del recargue HV [8]

Comparando la Figura 3-26 y la Figura 3-27 una considerable diferencia en la resistencia al desgaste, esto se debe principalmente a que solo estamos comparando resultados de dureza con resistencia al desgaste, mas no la microestructura y composición química del recargue, las cuales también son factores sumamente importante.

## CAPÍTULO 4

### 4. Conclusiones

- El contenido de vanadio en los depósitos de soldadura se incrementa conforme se aumenta el contenido de FeV en el revestimiento del electrodo de soldadura, siendo la serie 585 el que presenta mayor contenido de vanadio en su respectivo depósito de soldadura.
- Los ensayos de dureza y el análisis metalográfico demuestran que cada pase de recargue de soldadura afecta térmicamente al pase anterior, a mayor número de pases disminuye el problema de la dilución (por efecto del metal base) y aumenta la dureza del recargue superficial.
- La dureza del depósito se incrementó con el aumento de FeV en el revestimiento del electrodo de recargue. Con 5.85 % de FeV en el revestimiento del electrodo se logró alcanzar una dureza superficial promedio de 737 HV.

- Para todos los casos evaluados, las microestructuras observadas están compuestas por martensita en una matriz de austenita retenida. Superficialmente, en probetas con mayor contenido de FeV la austenita retenida disminuye.
- Para ninguna de las series evaluadas, la ausencia de grafito en el revestimiento del electrodo de recargue generó la formación de partículas de carburo en la microestructura del depósito de soldadura.
- La resistencia al desgaste se incrementa al aumentar la dureza promedio del depósito. El depósito de soldadura con una dureza promedio de 670 HV evidenció una pérdida de 0.554 gramos de material, mientras que el que alcanzó una dureza promedio de 586 HV evidenció una pérdida de 1.0665 gramos de material.
- Conforme aumenta el contenido de FeV en el revestimiento del electrodo las pérdidas por desgaste disminuyen, por lo tanto en este trabajo se comprobó que la serie 585 presenta mejor resistencia al desgaste abrasivo que las otras dos series evaluadas.

## Bibliografía

1. Wear Resistance.: mayo 30, 2012. <http://www.gordonengland.co.uk/wear.htm>.
2. *Estudio de la resistencia a la abrasión de bajo esfuerzo según ASTM G65 de tres recubrimientos duros aplicados mediante soldadura.* **Sakihama Uehara, Jose.** 2006, Tesis PUCP- Facultad de Ciencias e Ingeniería.
3. Failure Analysis And Prevention. **ASM International.** *ASM Metals HandBook Volume 11.* pp. 1916-2280
4. *Effect of abrasive particle size on abrasive wear of hardfacing alloys.* **Choteborky, Hrabe, Muller, Savkova, Navratilova.** 2009, Research in Agriculture engineers, pp. 101-113.
5. *Tribology Friction and Wear of Engineering Materials.* s.l. **HUTCHINGS, I. M.:** cambridge p 133- 171., 1992.
6. ¿ Y EL DESGASTE? **Fuentes, Rosalba.** 18 de Noviembre de 2011. <http://quimica.ugto.mx/revista/2/Desgaste.htm>.
7. *Transformaciones de fase en metalurgia* **Valencia, Asdrúbal.** Medellín. Colombia : Universidad de Antioquia, 1998.
8. *Microestructure and wear properties of the Fe-Ti-V-Mo-C hardfacing alloy.* **Wang, Han, Liu, Qu, Zou.** 2007, Wear, pp. 265(5-6), 583-589.
9. Rotating Wheel abrasive wear testing. **GEE, M. G** Inglaterra : National Physical Laboratory, 2002.
10. *Microestructure and wear properties of TiC-VC reinforced iron based hardfacing layers.* **Wang, Han, Liu, Qu, Zou.** 2008, Materials Science and Engineering, pp. Vol.22,193-198.
11. *Microestructure and abrasive wear behaviour of iron base hardfacing.* **Dwivedi, D K.** 2004, Material Science and technology, Vol. Vol. 20, p. 1326.
12. Grupo industrial Chipaxa S.A de C.V. [www.chipaxa.com](http://www.chipaxa.com). [Online] Diciembre 2011. [http://www.chipaxa.com/paginas/Abrasivos1.htm#Abrasivos agrícolas](http://www.chipaxa.com/paginas/Abrasivos1.htm#Abrasivos%20agr%C3%ADcolas).
13. *Recubrimientos Protectores.* **EXSA.** Manual de Soldadura y Catálogo de productos, Vol. VIII, pp. 136-138.
14. *Recuperación de piezas desgastadas con recubrimientos protectores.* **Malrulanda, Trujillo.** 2007, Universidad Tecnológica de Pereira.

15. USGS. **The United States Geological Survey** Abril 5, 2012. <http://minerals.usgs.gov/>.
16. *Behavior of iron-based hardfacing alloys under abrasion.* **M. Kirchgaßner, E. Badisch, F. Franek.** 2008, Vol. Wear 265. 772-779.
17. *Repair and Maintenance Procedures for Heavy Machinery Components.* **Dumovic, Milo.** 2002, 50th WTIA Annual Conference, pp. 26-30.
18. *Welding consumables-Hardfacing classification-Microstructures.* **The International Institute of Welding.** 2009, International Organization for Standardization.
19. *Effect of Molibdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings.* **Wang, Han, Zou, Liu, Qu.** 2008, Science and Engineering A, pp. 489(1-2), 193-200.
20. *Wear of titanium carbide reinforced metal matrix composites.* **O' .N. Dog'an ), J.A. Hawk, J.H. Tylczak, R.D. Wilson, R.D. Govier.** 2000, Wear, pp. Vol. 225-229, pag.758-769.
21. *Continuous impact/abrasion testing: influence of testing parameters on wear behaviour.* **Badisch, Kirchgabner, Franek.** 2009, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, pp. 741-750.
22. *New carbide standard adds impact to abrasion.* **Ken, Brookes.** 2009, Metal Powder Report, pp. Num.6, vol.64, pag 30-35.
23. *Electrodos Revestidos.* s.l. **Thermoequipos CA.:** Trabajo de investigación realizado por el departamento de ingeniería y proyectos de thermoequipos CA., 2004.
24. Terología: Tecnología de la reconstrucción **Zapata Meneses, Albert; Mesa Grajales, Dairo** **Hernan**  
[http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/849/84911948026/84911948026\\_1.html](http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/849/84911948026/84911948026_1.html). [Online] 2005.
25. *Continuous impact/abrasion testing: Influence of testing parameters on wear behaviour.* **Badisch, E., Kirchgaßner, M., & Franek, F.** 2009.
26. *Solidification and microstructural characterisation of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying.* **Vernon E. Buchanan.** 2008, Surface and Coatings Technology, pp. 3638-3646.
27. *BASIC WELDING FILLER METAL TECHNOLOGY.* **ESAB.** ESAB Welding & Cutting Products. Noviembre 2, 2011. [http://www.esabna.com/EUWeb/AWTC/Lesson8\\_1.htm](http://www.esabna.com/EUWeb/AWTC/Lesson8_1.htm).

