

TRABAJO ESPECIAL

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE BABBITT DEPOSITADOS POR ARCO-ELÉCTRICO UTILIZADOS EN COJINETES DE TURBINAS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central
de Venezuela
Por el Br.: Burgos C., Héctor L.
Para optar al título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2.002

TRABAJO ESPECIAL

EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE BABBITT DEPOSITADOS POR ARCO-ELÉCTRICO UTILIZADOS EN COJINETES DE TURBINAS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. María de los Ángeles Rodríguez de Prato

Presentado ante la ilustre
Universidad Central
de Venezuela
Por el Br.: Burgos C., Héctor L.
Para optar al título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2.002

DEDICATORIA

Al tiempo, al cuidado, al esmero, la dedicación y la constancia... Amor que solo te dan los Padres. Por supuesto para ustedes. Gracias Lesbia, gracias Roberto, los amo...

A mis hermanos: Lisbeth, Mabel, Desiree y Robert.

A mi abuelita Reina. "No sabes cuanto te extraño".

A la abuelita Carmen.

A Andreina Arévalo, gracias por todo tu apoyo y por todo tu amor, te amo...

Al Ser Supremo, creador del Cielo y de La Tierra, por darme toda esta gente.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Maria de los Ángeles Rodríguez de Prato, por el apoyo y dedicación.

Al profesor Ing. Andrea Scagni, por toda su colaboración.

A PLASMATEC INGENIEROS S.A., los técnicos y personal que allí laboran, por poner todas sus instalaciones a disposición.

Al Instituto Universitario de Tecnología (I.U.T.) en especial al Prof. Freddy Arenas y Domingo Da Silva, por poner a disposición los equipos y realizar la microscopía.

Al laboratorio de Aluminios (Citala) de la Escuela de Metalúrgica en, por permitir usar sus equipos y prestar toda su colaboración.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, al taller de mecanizado y los técnicos que allí laboran.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Al Prof. Crisantos Villalobos, no hay palabras para describir todo el apoyo brindado.

Al Prof. Juan Carlos Mestre, por colaborar en todo cuanto le fue posible.

A Hamgyt, por indicar todos los detalles de los recaudos necesarios.

A la Familia Arévalo Pulizzi, en especial a Andreina no hay palabras para describir todo mi agradecimiento y mi amor.

A Mario Rivas, por prestarme la computadora.

A mi “pana” Leonardo Ruiz, por todo el apoyo a lo largo de la carrera.

A mis compañeros de estudio: Elvis, Héctor, Antonio, Erick, Adriana, Marcos, Eduardo y los que no nombre perdonen. Gracias por compartir esta dura tarea.

A mis padres: Lesbia y Roberto, a mis hermanos Lisbeth, Mabel, Desiree, Ayarit y en especial a mi hermano del alma Roberto; no hay palabras para describir mi agradecimiento hacia ustedes.

BURGOS C., HÉCTOR L.

**EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE BABBITT
DEPOSITADOS POR ARCO-ELÉCTRICO UTILIZADOS EN
COJINETES DE TURBINAS**

Tutor académico: Prof. María de los Ángeles R. De Prato

Tesis. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas, 2.002. 112 páginas.

Palabras Claves: Rociado térmico, aleación Babbitt. Arco Eléctrico. Desgaste Abrasivo.

Los recubrimientos de Babbitt son muy utilizados en la industria para la fabricación y reparación de cojinetes de deslizamiento, ya que este material proporciona una baja fricción cuando dos metales se encuentran en contacto íntimo. En este trabajo se estudió la influencia de los parámetros de operación tales como, amperaje y presión de atomización, sobre la resistencia al desgaste por abrasión, la microestructura, porosidad y microdureza de un recubrimiento de Babbitt SAE 12 depositado mediante la técnica de Arco Eléctrico. La resistencia al desgaste abrasivo se evaluó de acuerdo a la norma ASTM G 65. La microestructura y composición de los recubrimientos fueron estudiadas a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) acoplado al espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (EDRX). Técnicas de análisis de imágenes fueron utilizadas para determinar la porosidad en los recubrimientos. La microdureza Vickers se realizó utilizando una carga de 50 gr. Los resultados muestran que los recubrimientos realizados con los parámetros de operación del proceso de rociado por Arco Eléctrico, 120-180 Amperios combinados con 450 KPa (65 Psi) como presión de atomización, son los más adecuados para depositar estas aleaciones, ya que producen recubrimientos con mayor resistencia al desgaste abrasivo, una microestructura más homogénea y bajo

porcentaje de porosidad cuando se comparan con los demás parámetros de deposición estudiados.

INDICE DE CONTENIDO

	Páginas.
PORTADA	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
INTRODUCCIÓN	VI
CAPITULO I	
Fundamento Teórico	
1.1.- Rociado térmico	2
1.1.1.- Definición	2
1.2.- Recubrimientos	3
1.2.1.- Porosidad	4
1.2.2.- Cohesión entre las partículas	5
1.2.3.- Adhesión al substrato	6
1.2.3.1.- Capa de adherente	8
1.2.4.- Estructura del recubrimiento	11
1.2.5.- Resistencia al desgaste	12
1.3.- Métodos de deposición	13
1.3.1.- Llama	15
1.3.1.1.- Ventajas	16
1.3.1.2.- Aplicaciones típicas	17
1.3.2.- HVOF (High Velocity Oxy Fuel)	18
1.3.2.1.- Ventajas	20
1.3.3.- Arco Eléctrico	21
1.3.3.1.- Aplicaciones en la industria	22

1.3.3.2.- Propiedades del proceso de Arco Eléctrico	23
1.3.3.3.- Ventajas	23
1.4.- Beneficios de un componente rociado	23
1.5.- Desgaste	24
1.5.1.- Tribología	24
1.5.2.- Definición de desgaste	25
1.5.3.- Clasificación del desgaste	26
1.5.4.- Abrasión	27
1.5.4.1.- Definición	27
1.5.4.2.- Clasificación del desgaste abrasivo	27
1.5.4.3.- Teoría del desgaste abrasivo	29
1.5.4.4.- Propiedades del material sobre el desgaste abrasivo	31
1.5.4.5.- Abrasivo	33
1.5.4.6.- Materiales resistentes al proceso abrasivo	38
1.5.4.7.- Ensayos normalizados	41

CAPITULO II

Metodología Experimental

2.1.- Caracterización de las muestras	44
2.1.1.- Materiales utilizados	44
2.1.2.- Geometría de las muestras	45
2.1.3.- Numero de muestras	45
2.2.- Procesos	46
2.2.1.- Preparación de la superficie de las muestras	46
2.2.2.- Proceso de rociado térmico por Arco Eléctrico	48
2.2.3.- Mecanizado de las piezas	50
2.3.- Ensayos realizados	51
2.3.1.- Preparación metalografica	51
2.3.2.- Microscopia Electrónica de Barrido	53
2.3.3.- Porosidad	53

2.3.4.- Ensayo de Microdureza Vickers	54
2.3.5.- Ensayo de desgaste Abrasivo	54
CAPITULO III	
Análisis de Resultados	
3.1.- Microcopia Electrónica de Barrido	64
3.2.- Porosidad	70
3.3.- Microdureza Vickers	71
3.4.- Desgaste Abrasivo	74
CAPITULO IV	
Conclusiones y Recomendaciones	
4.1.- Conclusiones	83
4.2.- Recomendaciones	85
CAPITULO V	
Referencias Bibliográficas	
5.1.- Referencias Bibliográficas	87
CAPITULO VI	
Anexos	
6.1.- Calculo de Densidad de Recubrimientos	90
6.2.- Calculo de Volumen Desgastado	91
6.3.- Calculo de Microdureza Vickers HV _{50gr.}	92
6.4.- Tablas de Datos y Resultados	93

INDICE DE FIGURAS

	Páginas.
Figura 1.1. Splats. Placa delgada que se forma cuando la partícula golpea la superficie del substrato aplanándose.	3
Figura 1.2 Esquema de métodos de rociado.	14
Figura 1.3 Proceso de rociado por Llama Oxiacetilénica.	15
Figura 1.4 Rociado de polvos utilizando el proceso de Llama.	16
Figura 1.5 Rociado de Alambre utilizando el proceso de Llama.	16
Figura 1.6 Instalación de un sistema de rociado por Llama.	17
Figura 1.7 Proceso de rociado por HVOF.	18
Figura 1.8 Rociado de polvos utilizando el proceso de HVOF.	19
Figura 1.9 Proceso de rociado por Arco Eléctrico.	21
Figura 1.10 Diagrama de pistola de Arco Eléctrico.	22
Figura 1.11 Instalación de un Equipo de rociado por Arco Eléctrico.	22
Figura 1.12 Procesos de Abrasión.	29
Figura 1.13 Factores que afectan las pérdidas por abrasión.	32
Figura 1.14 Máquina de Desgaste Abrasivo según Norma ASTM G 65.	42
Figura 2.1 Distribución de las muestras en el porta-probetas.	46
Figura 2.2 Limpieza con rociado de Tinner.	47
Figura 2.3 Cámara de Blasting.	47
Figura 2.4 Medida de Rugosidad.	47
Figura 2.5 Probetas con capa de adherente.	48
Figura 2.6 Panel de control del equipo de arco eléctrico.	48
Figura 2.7 Proceso de rociado térmico por arco eléctrico semi-automatizado.	49
Figura 2.8 Proceso de Mecanizado de las probetas, Máquina fresadora.	50
Figura 2.9 Cortadora Buhler.	51

Figura 2.10	Disco de cortadora.	51
Figura 2.11	Pulidora Buhler.	52
Figura 2.12	Equipo Usado para realizar la microscopía. (a) Espectrómetro de dispersión de Rayos X, Analizador de Imágenes, Microscopio Electrónico de Barrido, (b) Muestras embutidas listas para ser analizadas.	53
Figura 2.13	Microdurómetro Leitz Wetzlar 7520.	54
Figura 2.14a	Porta-probetas, Rueda de Caucho y Tobera de Abrasivo.	57
Figura 2.14b	Sistema brazo multiplicador con pesos.	57
Figura 2.14c	Máquina de ensayo, Panel de control con Temporizador.	58
Figura 2.15	Balanza analítica.	58
Figura 3.1 (a)	MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, 120Amp-310KPa (45Psi), 30X.	64
Figura 3.1 (b)	MEB de recubrimiento de Babbitt rociado, 120Amp-310KPa (45Psi), .2000X.	64
Figura 3.1 (c)	Gráfica de Análisis Químico puntual (EDS).	64
Figura 3.1 (d)	Detalle; partículas no fundidas.	65
Figura 3.2 (a)	MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, 120Amp-450KPa (65Psi), 30X.	65
Figura 3.2 (b)	MEB de recubrimiento de Babbitt rociado, 120Amp-450KPa (65Psi). 2000X.	65
Figura 3.3 (a)	MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, 180Amp-450KPa (65Psi), 30X.	66
Figura 3.3 (b)	MEB de recubrimiento de Babbitt rociado, 180Amp-450KPa (65Psi). 2000X.	66
Figura 3.3 (c)	Gráfica de análisis químico puntual (EDS)	66
Figura 3.4 (a)	MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, 250Amp-310KPa (45Psi), 30X.	67
Figura 3.4 (b)	MEB de recubrimiento de Babbitt rociado, 250Amp-310KPa (45Psi). 2000X.	67

Figura 3.5 (a) MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, 250Amp-450KPa (65Psi), 30X.	68
Figura 3.5 (b) MEB de recubrimiento de Babbitt rociado, 250Amp-450KPa (65Psi). 2000X.	68
Figura 3.6 Interfase de los recubrimientos. 1000X.	68
Figura 3.7 (a) Detalle. Partículas de material.	69
Figura 3.7 (b) Gráfica de análisis químico puntual (EDS). en interface, Cu-Al de recubrimientos.	69
Figura 3.8 Gráfica del porcentaje de porosidad de las muestras analizadas	70
Figura 3.9(a) Dureza de Recubrimientos de Babbitt vs. los diferentes parámetros de proceso de rociado por Arco Eléctrico utilizados para su deposición, en función de la presión.	71
Figura 3.9 (b) Dureza de Recubrimientos de Babbitt vs. los diferentes parámetros de proceso de rociado por Arco Eléctrico utilizados para su deposición, en función del amperaje.	71
Figura 3.10 Volumen desgastado en el ensayo vs. los diferentes parámetros de proceso de rociado por Arco Eléctrico utilizados depositar los recubrimientos.	..74
Figuras 3.11(a), (b) y (c) Volumen desgastado vs. Tiempo de ensayo de desgaste abrasivo.	75
Figuras 3.12 (a), (b) y (c) Volumen desgastado vs. Tiempo de ensayo de desgaste abrasivo.	76
Figura 3.13(a) Volumen desgastado vs. parámetros de deposición, en ensayo de desgaste abrasivo normalizado (30 seg.).	77
Figura 3.13(b) Volumen desgastado vs. parámetros de deposición, en ensayo de desgaste abrasivo normalizado (30 seg.)	77
Figura 3.14 Relación entre el Volumen desgastado y la	

	Microdureza HV ₅₀ .	79
Figura 3.15	Relación entre el Volumen desgastado y el % Porosidad.	80

INDICE DE TABLAS

		Paginas
Tabla 1.1	Materiales de enlace usados comúnmente y el método de aplicación.	10
Tabla 1.2	Comparación entre escala Mohs y Knoop.	34
Tabla 2.1	Composición química del Babbitt SAE 12.	44
Tabla 2.2	Distribución de muestras.	45
Tabla 2.3	Parámetros de proceso de capa de adherencia.	48
Tabla 2.4	Parámetros de deposición de los procesos de rociado térmico por Arco Eléctrico.	49
Tabla 2.5	Parámetros de proceso de rectificado de probetas rociadas.	50
Tabla 2.6	Pulido de las Muestras.	52
Tabla 2.7	Distribución del número de muestras para el ensayo de Abrasión.	55
Tabla 2.8	Parámetros del proceso de secado de la Arena Abrasiva	59
Tabla 2.9	Parámetros de la prueba de desgaste.	61
Tabla 3.1	Porcentaje de Porosidad de las muestras analizadas por MEB.	70
Tabla 6.1	Masas de las probetas antes del ensayo de desgaste (gr.).	93
Tabla 6.2	Masas de las probetas después del ensayo de desgaste (gr.).	93
Tabla 6.3	Diferencias de masas (gr.) (antes-después del ensayo de desgaste).	94
Tabla 6.4	Pérdidas Volumétricas (mm ³).	94
Tabla 6.5	Ajustes por Pérdidas Volumétricas (mm ³).	95
Tabla 6.6	Promedio de ajustes por pérdidas volumétricas (mm ³).	95
Tabla 6.7	Desviación Estándar de los promedio de ajustes por pérdidas volumétricas (mm ³).	95
Tabla 6.8	Microdureza Vickers HV _{50 gr.} , diagonales de improntas dejadas por el identador (0.001mm.).	96

Tabla 6.9	Microdureza Vickers HV _{50 gr.} , Promedio de las diagonales de improntas dejadas por el indentador (0.001mm.).	96
Tabla 6.10	Microdureza Vickers HV _{50 gr.} .	96
Tabla 6.11	Densidades de los Recubrimientos (gr./ml).	96

INTRODUCCIÓN

A través de los años el hombre ha ido perfeccionando todos los mecanismos de producción los cuales el mismo ha desarrollado. Métodos y sistemas de construcción y reparación de máquinas y sus elementos, se han ido optimizando a medida que se realizan diferentes estudios que aportan las modificaciones necesarias para llevar a cabo dicha mejora. Durante varios años el proceso de Rociado Térmico, se ha venido aplicando con gran eficacia sobre algunas superficies, a fin de mejorar propiedades físicas y mecánicas capaces de evitar de manera eficiente la degradación operacional y ambiental producidas por factores como el desgaste por abrasión y erosión, la corrosión, la oxidación, entre otros, que estimulan y aceleran el deterioro de muchos materiales. El Rociado Térmico es una técnica de deposición capaz de crear recubrimientos que soportan condiciones de operación severas, protegiendo así las superficies. Uno de los materiales más utilizados en la actualidad para resistir el desgaste, son las llamadas “aleaciones antifricción”. Una de ellas es el BABBITT, la cual puede ser depositada por rociado térmico ofreciendo un alto rendimiento de operación y una alta resistencia al desgaste, protegiendo así el material del sustrato.

De esta forma, la tecnología del proceso de rociado térmico ha surgido como una herramienta para la protección de superficies así como también para la recuperación y fabricación de piezas sometidas a condiciones severas de operación como lo son los cojinetes de deslizamiento, los cuales requieren superficies antifricción de esta calidad.

El Rociado Térmico combina la energía térmica para el calentamiento y fusión de materiales metálicos o no metálicos con la energía cinética para la

proyección y dispersión de las gotas sobre un substrato previamente preparado (Herbert et al. 1.997; Hower Jr, 1.994).

Un sistema básico de rociado térmico se encuentra generalmente conformado por una pistola de rociado, una fuente de poder o una consola para el control de gas y un alimentador de material de deposición, el cual podemos encontrar en forma de alambre o polvo.

La pistola de rociado puede usar arco eléctrico, plasma o combustible gaseoso, con el fin de generar el calor necesario para formar un rociado del material de deposición fundido compuesto por gotas entre 0.5 y 100 μm de diámetro, y luego ser transferido al substrato.

Entre las técnicas de aplicación más importantes, se encuentran las que utilizan electricidad como fuente de energía (Arco Eléctrico, Plasma) y las que utilizan combustión (HVOF, Llama, D-Gun).

El rociado térmico por arco eléctrico ha sido desarrollado como una de las técnicas para realizar recubrimientos de manera sencilla en muchas aplicaciones de ingeniería, sin embargo, su estudio, en cuanto a los múltiples factores técnicos de operación que intervienen a la hora de aplicar ciertos recubrimientos, es muy limitado.

En su oficio diario, muchos ingenieros que laboran en planta tienen la tarea de decidir reparar o reemplazar un componente de máquina. Para muchos componentes que fallan o se desgastan, una alternativa (para solucionar el problema) si no es costosa y puede obtenerse, es sin duda el reemplazo. Sin embargo, para muchos otros componentes, el reemplazo puede sobrepasar varias veces lo que costaría reconstruir la pieza con un recubrimiento de rociado térmico si este fuese el caso. Además, el rendimiento de las piezas a las que se les realiza un rociado térmico, es usualmente superior al de las nuevas. Debido a los altos costos de reemplazo e inventario, y la

alta calidad que ofrecen las piezas con recubrimiento por rociado térmico, hacen de esta técnica una buena elección.

Entre las llamadas “aleaciones antifricción” más comerciales, tenemos el Babbitt a base de estaño (86 a 90% estaño, 4 a 9% antimonio, 4 a 6% cobre, 0.35 a 0.6% plomo), a base de plomo (75 a 80% de plomo, 9 a 15% antimonio, 4 a 10% estaño) entre otras, estas pueden tener muchas aplicaciones donde se requiera una superficie con altas resistencias al desgaste y que generen poca fricción entre dos metales en contacto. Este es el caso de los cojinetes de deslizamiento que son componentes fundamentales de muchas de las máquinas que existen en la industria, como turbinas, motores de combustión interna, compresores, bombas, imprentas entre muchas otras.

En este trabajo serán evaluadas la micro dureza, la resistencia a la abrasión, y la microestructura de los recubrimientos de Babbitt a base de estaño, depositados con diferentes parámetros de operación (amperaje y presión de atomización) con la técnica de Rociado Térmico por Arco Eléctrico.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1.- ROCIADO TÉRMICO.

Los procedimientos que se llevan a cabo en el proceso de rociado térmico, son sofisticados y altamente especializados, con un amplio rango de aplicación en los campos de mantenimiento reconstructivo, de protección y manufactura. La naturaleza de estos procesos es la acción concentrada de varios componentes y variables, que actuando simultáneamente y aplicadas adecuadamente, producen un efecto mucho más grande que el de cada una de ellas cuando actúan individualmente. Por tal razón cada uno de los componentes y variables, deben ser comprendidos para permitir la selección de operación apropiada de un proceso particular.

1.1.1.- DEFINICIÓN.

El Rociado térmico comprende un grupo de procesos en los cuales se combina la energía térmica para el calentamiento y fusión de los materiales metálicos o no-metálicos con la energía cinética de proyección y dispersión de las gotas, estas impactan, se esparcen y solidifican sobre un substrato previamente preparado, para dotarlo de algún tipo de protección o mejorar propiedades superficiales (Herbert et al. 1.997; Hower Jr, 1.994).

En este proceso el material de alimentación se calienta hasta su estado plástico o de fusión por Combustión (Llama, HVOF, D-Gun) o por Electricidad (Arco Eléctrico, Plasma). Los materiales en su estado plástico o fundido son acelerados contra el substrato (material base). Las partículas o gotas golpean la superficie, aplanándose con el impacto y formando placas delgadas (Splats) que se adhieren y entrelazan con las irregularidades de la superficie rugosa y entre ellas mismas (ver **Figura 1.1**). El choque de partícula a partícula contra el substrato, consolida al enfriarse una capa de estructura lameliforme, dando forma al recubrimiento.

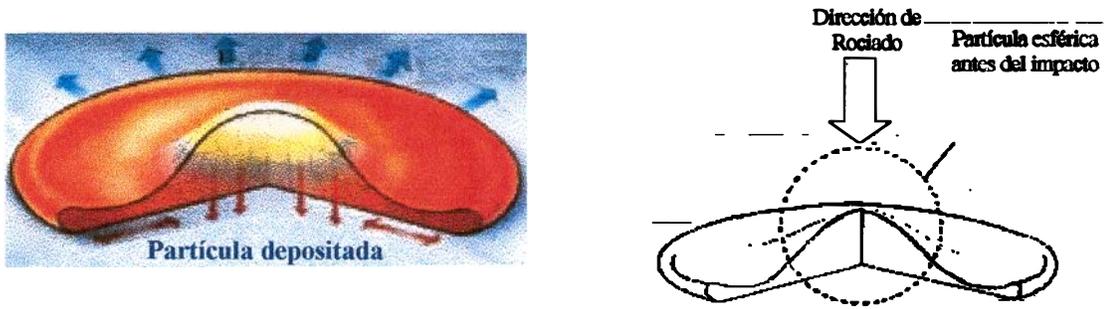


Figura 1.1. Splats. Placa delgada que se forma cuando la partícula golpea la superficie del sustrato aplanándose.

En general, la temperatura del sustrato se mantiene a 200°C o inferior a esta temperatura, con el fin de prevenir cambios metalúrgicos en el material del sustrato (Herbert, 1993).

Un recubrimiento rociados consiste de capas superficiales diseñadas para proveer resistencia al desgaste por erosión, desgaste por abrasión, y resistencia a la corrosión para la fabricación de componentes originales, así como también para los recuperados (Herbert, 1993). Los recubrimientos pueden aplicarse sobre una amplia variedad de materiales, incluyendo metales, cerámicos, plásticos y compuestos polímeros (Herbert et al, 1993).

1.2.- RECUBRIMIENTOS.

Entre la gran variedad de materiales que pueden ser rociados térmicamente sobre un sustrato, se pueden mencionar:

- Metales puros (Al. ZN. Ni. Cu, etc).
- Aleaciones (Acero Inoxidable. Inconel, etc.).
- Cerámicos (Cr₂O₃, Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, SiO₂).
- Superalloys (Base de Cobalto, Níquel. Hierro, etc).
- Lubricantes sólidos (Base Grafito. Nitrato de Boro).
- Compuestos (WC-Co. WC-CoCr. WC-Ni, Cr₃C₂-NiCr).

Las propiedades y la calidad de los recubrimientos varían en función de los parámetros de operación de los diferentes equipos y métodos de rociado; entre los cuales la velocidad de la proyección de las partículas juega un papel determinante así como la temperatura de fusión de las mismas, entre otras. Entre las características mecánicas y metalúrgicas más importantes que se pueden obtener en un recubrimiento rociado, se pueden destacar los siguientes:

- Porosidad.
- Cohesión entre partículas.
- Adhesión al Substrato.

1.2.1.-Porosidad.

La porosidad está presente en muchos recubrimientos rociados. Entre el 1 al 25% la porosidad es normal, sin embargo ésta puede tomar valores mayores debido a cambios en los procesos y en los materiales. La porosidad comúnmente se origina por:

- Baja energía de impacto, ocasionada principalmente por una baja velocidad de rociado (partículas no fundidas)
- Efecto de sombra, determinado por el ángulo de rociado del material (partículas no fundidas)
- -Efecto de Contracción.

La interacción de los efectos anteriores puede lograr que los recubrimientos sean químicos y físicamente muy diferente a sus materiales de origen. La porosidad puede convertirse en un factor perjudicial en los recubrimientos, ya que propicia la aparición de los siguientes elementos:

- La Corrosión, ya que permite el paso de sustancias corrosivas dentro del recubrimiento(en caso de encontrarse un gran % de porosidad, se recomienda sellar el recubrimiento).
- -El acabado final, ya que no se produce una superficie visualmente uniforme y en el caso de requerirse una superficie pulida no se obtendrá en forma aceptable.
- En la reducción de los niveles de tensión, pues las fuerzas cohesivas de las partículas no son tan altas al encontrarse vacíos, poros o grietas entre ellas.

La porosidad es un factor que influye sobre:

- La Lubricación, debido a que actúa como depósito de los lubricantes.
- El incremento de las propiedades de barrera térmica, debido a que otorga una resistencia adicional al material, trayendo como consecuencia una oposición mayor al paso del flujo de calor lo que es directamente proporcional aun aumento de estas propiedades.
- El aumento de la resistencia al impacto, ya que actúa como agente amortiguador del choque y como barrera en la trayectoria de las grietas originadas.

1.2.2.- Cohesión entre partículas.

En líneas generales se puede decir que los recubrimientos tienen fuerzas de enlace bajas, pobre resistencia al impacto y baja ductilidad. Estas propiedades tienden a ser dictadas por "el eslabón más débil en la cadena" que en los recubrimientos es la partícula o el límite de grano y la interface del substrato-recubrimiento. La efectividad de las fuerzas de enlaces está reducida y puede ser destruida aumentando los niveles internos de tensión.

1.2.3.- Adhesión al sustrato.

La adhesión ocurre cuando dos cuerpos se unen por un íntimo contacto interfacial molecular, de tal manera que se forma una unidad. La adhesión es un fenómeno complejo relacionado a los efectos físicos y a las reacciones químicas en la "interface" (Baghdachi J. 1997).

Las fuerzas de adhesión se forman cuando el recubrimiento se aplica al sustrato y durante el secado de las partículas impactadas. La magnitud de estas fuerzas dependerá de la naturaleza de la superficie y el adhesivo (resina, polímero). Estas fuerzas pueden ser obviamente clasificadas como fuerzas de valencia primaria y fuerzas de valencia secundaria. Los enlaces químicos son ejemplos de las fuerzas de valencia primaria y proporcionan elevados valores de adhesión comparados con los que proporcionan las fuerzas secundarias. Los enlaces de valencia secundaria están basados sobre muchas fuerzas físicas débiles caracterizadas por enlaces de hidrógeno. Estas fuerzas se aprecian en materiales que tienen grupos polares tales como ácido carboxílico y superficies no polares tales como polietileno.

Los actuales mecanismos de unión del recubrimiento no son todavía completamente entendidos. Sin embargo, las fuerzas que unen a los dos cuerpos en contacto pueden ser: tipo mecánico, difusión, atracción electrostática o enlaces químicos reales entre el recubrimiento y el sustrato. Dependiendo de la química y física de ambos: superficie del sustrato y del recubrimiento usado, uno o una combinación de estos mecanismos postulados pueden estar involucradas (Baghdachi J, 1997).

Teoría de enlaces Mecánicos.

El mecanismo de adhesión ocurre cuando la superficie del sustrato contiene poros, huecos, hendiduras y vacíos dentro del cual el recubrimiento solidifica. De esta manera el recubrimiento, al igual que una uña en la madera se ancla. Si el sustrato ha permitido que penetre el recubrimiento y se seque en áreas huecas del mismo, un componente mecánico hace aun más difícil la remoción del recubrimiento, análogo a

sostener dos pedazos unidos de madera. Muchos análisis instrumentales y perfiles trazados de varias superficies indican que la capa puede escurrirse o penetrar, formando hendiduras y grietas donde, al secarse una masa dura, proporciona atadura mecánica.

La rugosidad de la superficie afecta el área interfacial entre el recubrimiento y el sustrato. Las fuerzas requeridas para remover el recubrimiento están relacionadas con el área geométrica superficial, del mismo modo las fuerzas que unen el recubrimiento con el sustrato están relacionadas al área real de contacto interfacial, la dificultad de remover un recubrimiento se puede incrementar incrementando el área superficial.(Baghdachi J,1997).

Superficies altamente rugosas son solamente ventajosas si el recubrimiento penetra completamente dentro de todas las irregularidades de la superficie. Una falla al penetrar completamente, puede inducir a disminuir el recubrimiento en el contacto interfacial de la correspondiente área mecánica y dejará huecos entre el recubrimiento y el sustrato. Las burbujas atrapadas en los huecos acumularán humedad y eventualmente resultará una adhesión pobre. (Baghdachi J, 1997).

Teoría de Enlaces Químicos.

En el recubrimiento, la formación de enlaces químicos covalentes a través de las interfaces es muy probable. Este tipo de enlace se espera que sea muy fuerte y duradero. El enlace químico en la interface es difícil de detectar, debido principalmente a lo delgado de las líneas de interfaces. Sin embargo, se ha mostrado que los enlaces químicos interfaciales ocurren, y contribuyen en gran parte a la fuerza de adhesión.

Algunas superficies, como las superficies previamente cubiertas: madera, compuestos y algunos plásticos contienen varios grupos químicos funcionales los cuales, bajo condiciones apropiadas pueden producir enlaces químicos en el material-recubrimiento. (Baghdachi J, 1997).

Teoría de Enlaces Electroestática.

Es posible que las fuerzas electrostáticas en forma de una doble capa eléctrica se produzcan en la interface sustrato-recubrimiento. Pero los recubrimientos y las superficies contienen cargas eléctricas residuales dispersas a lo largo de todo el sistema. La interacción entre estas cargas puede explicarse por alguna adhesión. Las fuerzas electrostáticas son principalmente fuerzas de dispersión. Un atractivo importante de las fuerzas entre las moléculas del sustrato que poseen un momento dipolo permanente, es la atracción dipolo-dipolo entre la región polarizada positiva de una molécula y la región polarizada negativa de otra. Se produce una atracción dipolo-inducido llamada fuerzas de London, o una energía de dispersión del tipo de fuerzas de Van der Waals que también contribuyen a la adhesión. Para determinados sistemas superficie-recubrimiento, estas fuerzas proveen gran atracción entre los mismos. Esto se notó en las interacciones que son solamente operacionales sobre un muy pequeño rango y su efectividad disminuye con la sexta o séptima potencia de la distancia de separación. (Baghdachi J, 1997).

1.2.3.1.- Capas de Adherente.

Una capa de enlace o adherente, es una película delgada (0,08 a 0,5 mm) que se aplica mediante rociado térmico al sustrato antes de depositar el recubrimiento deseado. El objetivo es obtener mejor adhesión al sustrato. Un gran número de materiales para capas de enlace se han desarrollado y utilizado a través de los años. Frecuentemente, las capas de enlace se pueden seleccionar por su capacidad para proteger al sustrato así como también por sus habilidades para enlazarlo. Muchos materiales rociados requieren que el sustrato sea preparado por un procedimiento de rugosidad, usualmente granallado, para obtener un enlace mecánico al sustrato (Wigren J., 1984). Con los materiales autoenlazantes, el procedimiento para generar rugosidad no es siempre necesario. Los materiales autoenlazantes son usados

comúnmente como bases donde las propiedades de algunos otros materiales son deseadas para los recubrimientos externos.

Los más antiguos materiales autoenlazantes, que poseen una adherencia confiable sobre una superficie lisa de muchos metales, son los materiales refractarios (ver **Tabla 1.1**): molibdeno, niobium y tantalio. Por razones de economía los dos últimos no se emplean como materiales de enlace. Otros agentes enlazantes de gran éxito son las aleaciones de Níquel-Aluminio, Níquel-Cromo y Aluminio-Bronce (Handbook of thermal spray, 1979).

Molibdeno es un material muy duro y resistente a la abrasión. Se ha utilizado como capa de enlace desde 1940 y aún es usado en la actualidad.

Las aleaciones de Níquel-Cromo (80% Ni-20% Cr) se ha usado desde 1950 en ambas formas polvo y alambre, como un recubrimiento resistente a la oxidación a temperaturas por encima de los 982°C y como una capa de enlace bajo óxidos cerámicos, para temperaturas superficiales similares. La aleación Níquel-Cromo (NiCr), no es autoenlazante y requiere una superficie granallada para obtener el enlace mecánico necesario. Sin embargo, este material es muy usado como base, particularmente bajo recubrimientos de cerámicos refractarios, tales como Zirconia y Alúmina. La base de NiCr ofrece protección adicional al substrato de la acción corrosiva de fluidos que penetran así como una mejoría del enlace del cerámico a la base. Los metales se adhieren un poco mejor a superficies granalladas que los cerámicos. En 1964, los primeros materiales de Níquel-Aluminio (80%Ni.20%Al) se introducen incrementando en gran medida las fuerzas de enlace alcanzadas. El mecanismo de enlace en este compuesto se obtiene por la reacción exotérmica entre el níquel y el aluminio. Posteriormente se introdujo un compuesto mejorado de Níquel-Aluminio (95% Níquel 5% Aluminio).

TABLA 1.1 Materiales de enlace usados comúnmente y el método de aplicación.

Material	Arco (alambre)	Llama (polvo)	Plasma (polvo)	Llama (alambre)
80/20 Ni Al	x	x	x	x
83/17 Ni Al	x	x		x
95/5 Ni Al	x	x	x	x
Ni Cr Al	x		x	x
80/20 Ni Cr	x			x
Al Bronce	x	x	x	
Molibdeno			x	x
Columbium			x	
Tantalio			x	
90/5/5 Ni Al Mo		x	x	

Con la finalidad de incrementar la resistencia a las temperaturas de oxidación, un polvo compuesto de Níquel-Cromo y Aluminio (94% NiCr/6% Al) ha sido desarrollado.

Las razones para usar una capa de enlace o adherente son innumerables. La principal es la deseada para mejorar la fuerza de enlace del recubrimiento al sustrato. Generalmente el uso de una capa de enlace mejora enormemente la fuerza adhesiva del enlace de un sistema sustrato- recubrimiento.

1.2.4.- Estructura del recubrimiento

La estructura del recubrimiento es heterogénea y está condicionada a la técnica que se usó para realizar el trabajo y al material que se utilizó. Esta estructura es debida a variaciones en la condición de las partículas individuales en el momento del impacto. Es imposible asegurar que todas las partículas son del mismo tamaño y alcanzan la misma temperatura y velocidad.

Una gran variedad de materiales rociados se transportan en aire para su atomización. Las interacciones químicas ocurren durante el rociado, especialmente la oxidación. Las partículas metálicas se oxidan sobre la superficie del substrato formando una cascarilla de óxido o partículas de óxido. Esto se evidencia en la microestructura del recubrimiento como inclusiones de óxido que perfilan el grano o límites de la partícula.

Los recubrimientos muestran granos lameliformes o aplanados formados en un flujo paralelo al substrato. La estructura no es isotrópica. Las fuerzas en la dirección longitudinal pueden ser de 5 a 10 veces mayor que en la dirección transversal.

Óxidos.

A la hora de depositar un recubrimiento, la mayoría de los materiales metálicos sufren oxidación en el aire durante el rociado normal. Los productos de oxidación que normalmente son incluidos en el recubrimiento, son generalmente más duros que el metal base. Los recubrimientos con alto contenido de óxidos son normalmente más duros. Los óxidos en los recubrimientos pueden ser perjudiciales frente a la corrosión, los esfuerzos y al maquinado, pero a su vez beneficiosos si se requiere un recubrimiento resistente al desgaste y con altas durezas.

Tensión.

El enfriamiento y la solidificación de la mayoría de los materiales generan una reducción de volumen o una contracción. Cuando las partículas golpean rápidamente

se enfrían y solidifican. Esto genera esfuerzos de tensión dentro de la partícula y esfuerzos de compresión en la superficie del sustrato. Cuando el recubrimiento se consolida, aparecen los esfuerzos residuales en él. Por lo tanto, si se realizan muchas pasadas al rociar el material; se obtendrá un espesor en el cual los esfuerzos de tensión excederán la fuerza de enlace o fuerza cohesiva y ocurrirá la falla del recubrimiento.

1.2.5.- Resistencia al desgaste.

Los revestimientos rociados son utilizados para incrementar la resistencia al desgaste de materiales suaves o sustratos deteriorados. El deterioro de una superficie debido al uso, incluye erosión debida a flujo de gas, líquido o partículas sólidas, o una combinación de ellos. Movimiento de raído, desgaste por deslizamiento, desgaste combinado de impacto y deslizamiento, y cavitación, entre otros.

Existen muchos métodos para evaluar el desgaste, entre ellos las pruebas de servicio simulado y otras pruebas normalizadas. Los resultados de las pruebas son útiles como ayuda en la selección de un revestimiento, ya que varios factores tienen que ser individualmente seleccionados y evaluados. Los resultados de servicio simulado tienen una aplicación práctica limitada, porque pueden haber otros factores críticos en el servicio real. Para definir las características de desgaste de los depósitos rociados es necesario definir las condiciones de servicio.

Los revestimientos rociados son generalmente más resistentes al desgaste que el material en forma de fundición o en su forma original. Esto es atribuido a la tasa de templado, estructura resultante, porosidad y, en el caso de revestimiento metálicos, el contenido de óxido. La porosidad de los revestimientos les permite mantener una película lubricante. Una ventaja de la porosidad es que puede contener partículas generadas durante el desgaste exponiendo de esta forma superficies de contacto limpias.

1.3.- MÉTODOS DE DEPOSICIÓN.

En la actualidad existen innumerables métodos de deposición para obtener un recubrimiento (ver **Figura 1.2**). Las propiedades de un recubrimiento son en gran medida dependientes del método empleado y de sus parámetros de deposición. Los procesos de rociado térmico difieren básicamente en tres aspectos fundamentales:

- I.** Uso del material de alimentación; éste puede rociarse en forma de polvo, alambre, vara cerámica y cordón, dependiendo de las facilidades del material para convertirse en cualquiera de esas formas.
- II.** El Método de calentamiento aplicado; se refiere al sistema que se utiliza para generar la energía necesaria capaz de fundir el material y formar las partículas que conforman el material a ser rociado.
- III.** El Método de propulsión del material sobre el sustrato:
La clasificación se hace según la velocidad que adquieran las partículas del material a ser rociado, sea supersónica, o subsónica. La velocidad dependerá, de los componentes del sistema de rociado, fundamentalmente de la pistola de rociado.

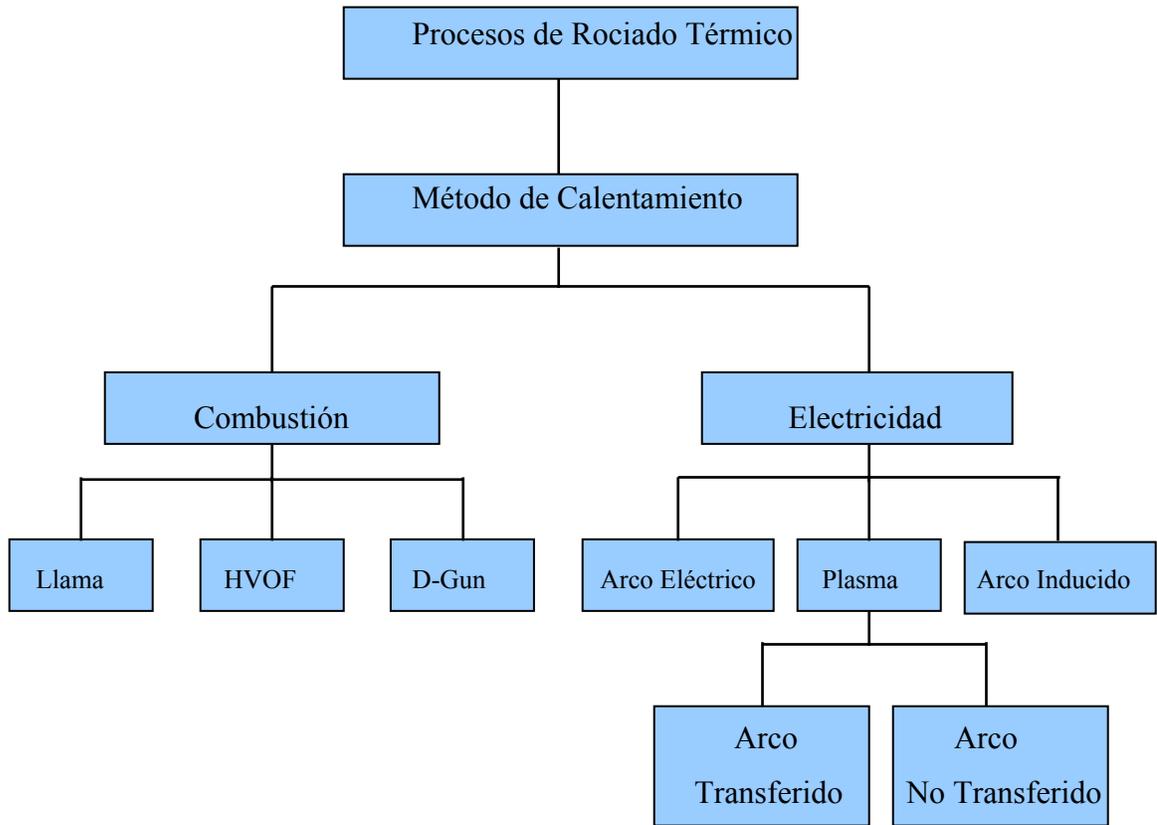


Figura 1.2 Esquema de métodos de Rociado térmico.

1.3.1.- Llama.

El proceso por llama ocurre a bajas velocidades, y utiliza el calor proporcionado por su llama. Es el proceso más simple y versátil. Las diferentes formas del material de alimentación pueden rociarse con este proceso subsónico. El material de alimentación es fundido por una llama oxiacetilénica (ver **Figura 1.3**).

En el rociado de polvo con llama, las partículas de polvo se calientan a 2200°C, e impactan el sustrato a 30m/s. El polvo es transportado por un flujo de gas dentro del área de combustión donde las partículas son fundidas y proyectadas al sustrato por la fuerza de la llama (ver **Figura 1.4**).

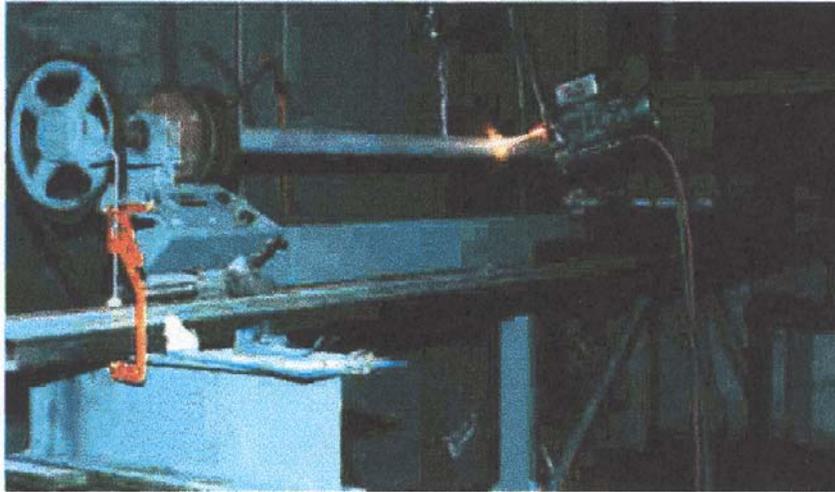


Figura 1.3 Proceso de rociado por Llama Oxiacetilénica.

La tasa de alimentación del polvo dentro del área de combustión es importante en este proceso. Si es baja, algunos polvos pueden volatilizarse, incrementando los costos de operación y deteriorando la calidad de la superficie. Si la velocidad es alta, el polvo no puede ser totalmente fundido, disminuyendo la eficiencia y aumentando la posibilidad de que existan partículas no fundidas atrapadas en el recubrimiento. Usualmente las pistolas tienen algún dispositivo para ajustar la tasa de alimentación del polvo dentro del flujo de gas (Herbert et.al, 1997).

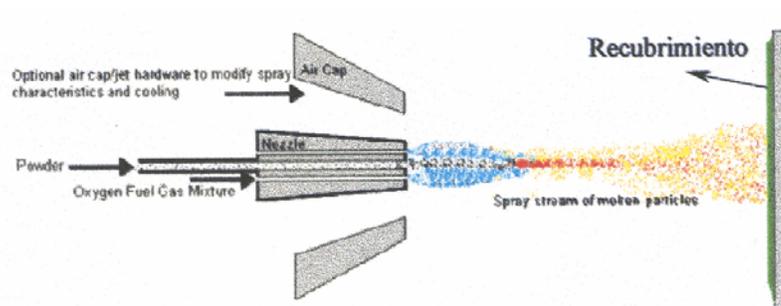


Figura 1.4 Rociado de polvos utilizando el proceso de Llama.

Cuando el material de alimentación está en forma de alambre las partículas del mismo son fundidas y atomizadas a una temperatura de 2800°C , e impactan sobre el sustrato a 180m/s . El elevado flujo de gas usado en el rociado por llama con alambre, otorga a las gotas gran energía de impacto (ver **Figura 1.5**). La velocidad de la partícula en el rociado por llama con polvo es mas baja, esto puede producir una reducción en la adhesión y en un incremento en la porosidad, si se compara con otros procesos de rociado térmico (Herbert H et. al, 1997).

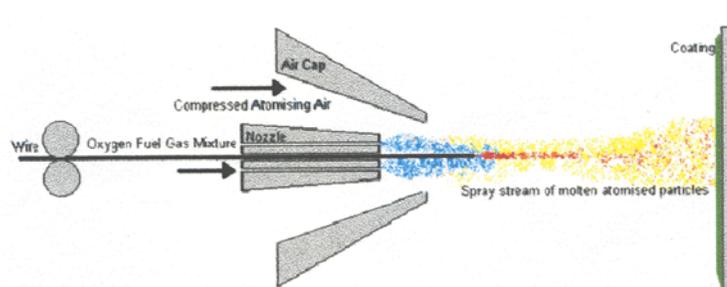


Figura 1.5 Rociado de Alambre utilizando el proceso de Llama.

1.3.1.1.- Ventajas.

Son sistemas económicos con una vida útil larga.

- Fáciles de operar.
- Versátiles y fiables.

- Ruido operacional relativamente bajo.
- Pueden usarse gran variedad de materiales para el recubrimiento, en el rociado de polvo.
- Portabilidad.
- El proceso puede automatizarse.

1.3.1.2.- Aplicaciones típicas.

- Operaciones de construcción y recuperación de piezas.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al desgaste por deslizamiento.
- Resistencia al impacto.
- Resistencia al Ataque Químico.
- Control de la corrosión atmosférica.

Un montaje frecuente para sistemas de rociado de alambre por el proceso de llama es el que se muestra en la **Figura 1.6**, el cual consta de la pistola para rociar el material, oxígeno y Combustible por la combustión, reguladores de flujo, para el alambre, etc.

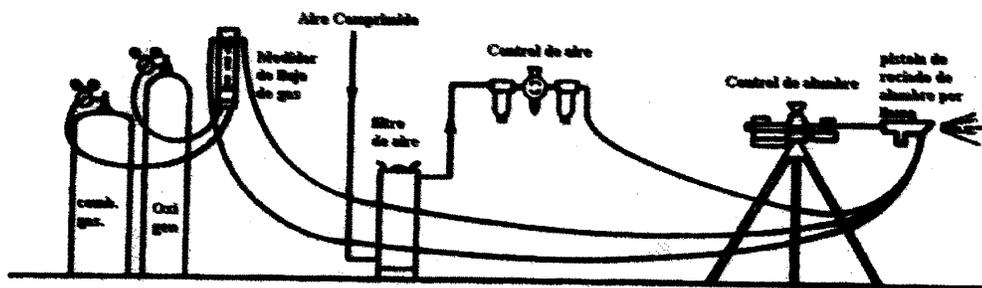


Figura 1.6 Instalación de un sistema de rociado por Llama.

1.3.2.- HVOF (High Velocity Oxy-Fuel).

El proceso de rociado por la técnica de HVOF fue creado por Smith et. al. En 1958 en la compañía Unión Carbide. Utiliza oxígeno y combinaciones con combustibles tales como propileno (C_3H_6), hidrógeno, propano y eventualmente combustible líquido como kerosene (ver **Figura 1.7**).

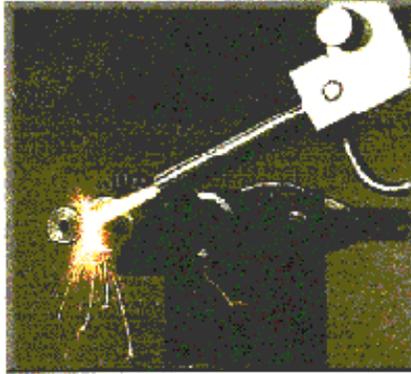


Figura 1.7 Proceso de rociado térmico por HVOF.

El proceso consiste en inyectar oxígeno y otro combustible, dentro de una cámara de combustión y los productos de la combustión son acelerados por una boquilla convergente-divergente. Las partículas son inyectadas a través de un hueco de inyección localizado aguas debajo de la boquilla y son calentadas y aceleradas en el tubo de aceleración (ver **Figura 1.8**).

Los procesos de hipervelocidad pueden tener dos modalidades: alta velocidad oxígeno combustible y alta velocidad aire combustible. La escogencia del equipo depende de los niveles de presión de trabajo. De esta manera si la presión es de 50psi a 150psi el combustible quemador es aire, si las presiones están comprendidas entre 150 y 1200psi se requiere aire enriquecido con oxígeno y por encima de 1200psi se requiere oxígeno puro.

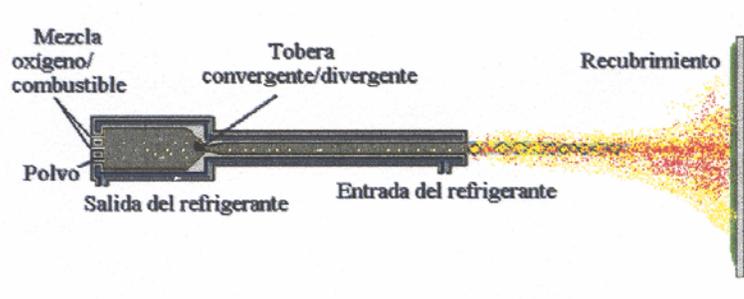


Figura 1.8 Rociado térmico de polvos utilizando el proceso de HVOF.

Esta mezcla de gas y partículas es entonces descargada fuera de la antorcha al sustrato el cual se encuentra a una cierta distancia de la salida del tubo de aceleración. La expansión proveniente de una región de alta presión (zona de combustión) a la presión atmosférica da como resultado una significativa caída en la temperatura. Polvos inyectados dentro de un flujo supersónico a una temperatura estática más baja que el punto de fusión del material pulverizado, aceleran las partículas sólidas hasta velocidades extremas a través de un largo tubo o tobera convergente divergente. El calentamiento debido al impacto, funde el material cuando impacta contra la pieza de trabajo, de tal manera que se forma un recubrimiento.

Las pistolas de HVOF tienen una sección de combustión (enfriada con aire o agua) la cual carburara la mezcla combustible-oxígeno baja o presión, y acelera los gases carburados a través de un tubo de confinación enfriado. Los polvos junto con el gas transportador, son alimentados dentro de la boquilla donde las partículas entran con los gases que han sido confinados y carburados a alta presión. La aceleración del gas producida por HVOF incrementa la velocidad de la partícula con el consecuente incremento en la densidad, adherencia y con una mas fina distribución de inclusiones de óxidos. A pesar del menor promedio de temperatura de la partícula, se obtiene una alta densidad de recubrimiento debido a que la alta velocidad de impacto de la partícula la deforma fácilmente a pesar de no haber sido fundida totalmente.

Las velocidades del gas a la salida son tan altas que en la mayoría de los procesos de HVOF se han encontrado múltiples choques en forma de diamante en el chorro de gas lo cual demuestra los cambios rápidos de la densidad del gas en la

estructura luminosa del chorro, indicando la naturaleza supersónica de la velocidad del gas a la salida. Aunque el número de diamantes de choque hablan de la velocidad del gas no es una indicación directa del número de Mach (Velocidad relativa a la velocidad del sonido). Investigadores han calculado y en algunos casos medido, la velocidad del gas a la salida, encontrándose valores de 1 y 2 Mach, el cual para el gas dado y la temperatura de rociado por HVOF es aproximadamente 1000 m/seg. Los procesos de HVOF se pueden dividir en cuatro grandes diseños:

- I. Combustión interna con gases calientes directamente dentro de una cámara donde éstos se mezclan, se calientan y se unen con el gas transportador y las partículas de polvo.
- II. Inyección simultánea de polvo dentro de la cámara de combustión donde la mezcla continuamente se quema y calienta las partículas.
- III. Combustión confinada dentro de la cual una corriente de polvo con gas transportador es inyectada.
- IV. Sistema de combustible líquido a alta presión con inyección radial de polvo aguas debajo de la salida del combustor.

1.3.2.1.- Ventajas.

- Gran densidad en el recubrimiento.
- Menor porosidad comparada con otros procesos.
- Enlaces más fuertes y mayores fuerzas cohesivas.
- Valores de dureza más altos.
- Menor contenido de partículas no fundidas.
- Menor contenido de óxidos.
- Calentamiento más uniforme y eficiente de la partícula.
- Menor temperatura final por el tiempo reducido de vuelo de la partícula.
- Menos esfuerzos residuales.
- Barrera de corrosión mejorada.

1.3.3.- Arco Eléctrico.

En el proceso de rociado térmico por Arco-Eléctrico, el material de alimentación se emplea en forma de alambre. Este proceso difiere de otros procesos de rociado térmico desde el punto de vista que no necesita de una fuente de calentamiento externa tal como una llama de gas o como el de plasma eléctrico inducido (ver **Figura 1.9**).

Este proceso opera mediante el calentamiento y la fusión de dos alambres consumibles con cargas eléctricas opuestas. Un alimentador empuja los dos alambres a través de la pistola por medio de un motor, el cual controla que estos dos alambres se intercepten en la punta de la pistola para que produzcan un arco eléctrico que hace que ambos alambres se fundan a temperaturas por encima de los 5.500 °C (10.000°F) (ver **Figura 1.10**).

En la pistola se encuentra incorporada una tobera que dirige un chorro de aire (o en casos especiales, gas inerte) a elevada velocidad hacia la punta de los alambres de manera tal que impulsa y atomiza las partículas de metal derretidas (formadas por el arco eléctrico, Splats) acelerándolas hacia la superficie del substrato a una velocidad de 240 m/s para formar el recubrimiento.



Figura 1.9 Proceso de rociado térmico por Arco Eléctrico.

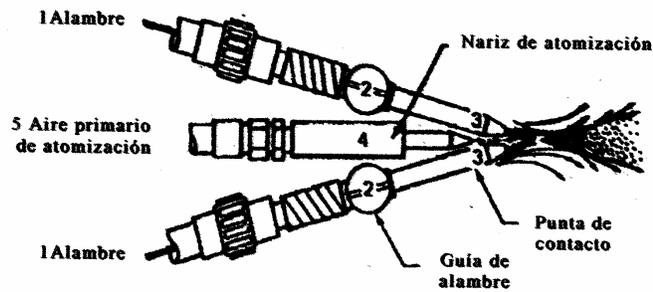


Figura 1.10 Diagrama de pistola de Arco Eléctrico.

Un equipo de rociado por Arco (ver **Figura 1.11**) consiste de una planta de poder DC, dos rollos de alambre de alimentación, una pistola de rociado y un sistema de suministro de aire comprimido. La tensión suministrada puede oscilar entre 18 y 40 Voltios. Generalmente el voltaje se mantiene tan bajo como sea posible mientras se tiene la estabilidad del arco. El tamaño de la partícula se incrementará si aumenta el voltaje. (Welding Workbook, 1997).

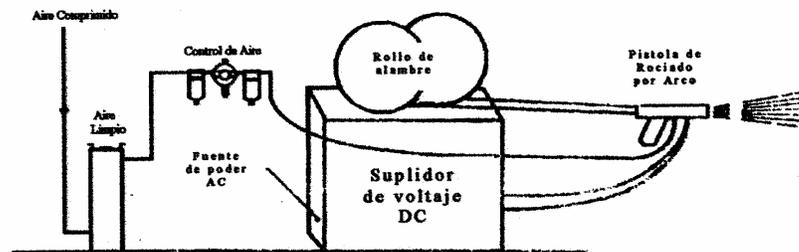


Figura 1.11 Instalación de un Equipo de rociado por Arco Eléctrico.

1.3.3.1.- Aplicación en la Industria.

- Industria Automotriz.
- Industria Naval.
- Conductores Eléctricos.
- Aeronáutica.
- Recuperación de piezas.

1.3.3.2.- Propiedades de los recubrimientos.

- Nivel de Porosidad: menor al 15 %.
- Contenido de Oxido: 0,5 - 3 %.
- Buena Adherencia.

1.3.3.3.- Ventajas

- Permite depositar materiales de bajo costo resistentes a la corrosión.
- No transfiere calor al Substrato por encima de 140°C.
- Presenta un alto rendimiento energético.
- Produce pocos gases contaminantes.
- El equipo es fácil de trasladar.

1.4.- BENEFICIOS DE UN COMPONENTE ROCIADO.

La razón por la cual las piezas rociadas son más duraderas, es porque el recubrimiento le ofrece algunas vías de protección:

1. Crea una capa-barrera contra el ambiente corrosivo, protegiendo el substrato.
2. Pasiva el substrato de acero, volviéndolo menos activo. Se forma una película delgada adherente pasiva en la superficie del metal.
3. Es posible inhibir la corrosión en las superficies rociadas, pues es factible rociar materiales que contengan elementos inhibidores de óxido como el Níquel, para que se oxide en menor grado el recubrimiento.
4. Las fuerzas de cohesión son elevadas, por lo que son superficies resistentes al desgaste.

1.5.- DESGASTE.

1.5.1.- Tribología.

En las últimas décadas se ha producido un creciente interés en el fenómeno de desgaste y se ha realizado un esfuerzo considerable en la explicación de sus causas y en la predicción de sus consecuencias. Como reflejo de este interés, se han agrupado las disciplinas involucradas en la interacción de superficies en contacto, con movimiento relativo, en presencia o ausencia de algún medio interpuesto. A la unión de estos tópicos se le ha dado el nombre de Tribología.

Podremos definir entonces la Tribología como la ciencia que interpreta en su totalidad los fenómenos emergentes de superficies que interactúan con movimiento relativo entre sí. Gramaticalmente hablando el término griego "Tribos" significa frotar, rozar. La tribología estudia entonces los mecanismos de fricción.

Fricción.

Es la resistencia generada al mover un cuerpo tangencialmente sobre la superficie de otro. Existen diversos tipos de fricción, tales como fricción interna, fricción entre líquidos, o fricción entre sólidos (Rabinowicz. 1965).

La fricción permite iniciar y detener el movimiento de cualquier proceso mecánico. Pero en forma más amplia gobierna gran cantidad de fenómenos tecnológicos de la más variada naturaleza. Muchos son los mecanismos que generan la fuerza de fricción. Incluso los métodos de medida pueden alterar los resultados obtenidos. La presencia de óxidos o películas interpuestas entre las superficies también pueden hacer variar los resultados. Por todo esto, los valores de coeficientes de fricción (los cuales difieren entre un 20 y 30% en función de los diferentes laboratorios), son sin embargo, una orientación importante para interpretar y prever los fenómenos producidos entre superficies deslizantes.

En algunos casos es indispensable disminuir al mínimo la fricción, tal como ocurre en cojinetes, frenos, bandas de deslizamiento, etc.

Se debe destacar la importancia que tiene la energía de fricción y el calentamiento producido por éste para cualquier fenómeno de desgaste que ocurra sobre alguna superficie.

1.5.2.- Definición de Desgaste.

El desgaste es un desprendimiento gradual de partículas de la superficie de un material sólido, por fricción con otro sólido, o por contacto con un líquido o gas en movimiento. El daño a la superficie supone desplazamiento y separación de partículas, acelerado por el calor desarrollado en la fricción, y por esta razón, el desgaste en seco va acompañado con frecuencia de corrosión.

El desgaste no se considera como una propiedad inherente del material puesto que sólo se produce por la interacción de dos cuerpos en contacto y en movimiento y está determinado, en gran parte, por condiciones externas independientes de la naturaleza del material.

En un sistema tribológico, al desgaste se lo considera como todo material removido o indeseablemente desplazado por efecto de las superficies que interactúan dentro del medio en que trabajan.

Comparable a la corrosión por su magnitud y aún mayor, según sea el perfil industrial del país, es indispensable controlar sus efectos, midiendo e interpretando claramente sus causas. De allí la importancia de la Tribología como disciplina.

El desgaste es una falla inevitable dondequiera que existan cuerpos en contacto bajo carga, con movimiento relativo. De hecho, entre las principales causas que hacen necesario el mantenimiento de la maquinaria industrial se encuentra el desgaste. Normalmente, el desgaste no ocasiona fallas violentas, pero trae como consecuencia: reducción de la eficiencia de operación, pérdidas de potencia por fricción, incremento del consumo de lubricantes y eventualmente conduce al reemplazo de componentes desgastados ya la obsolescencia de las máquinas en su conjunto.

1.5.3.- Clasificación del Desgaste.

Dependiendo del medio en el que se encuentre la interfase (contacto entre las piezas con movimiento relativo), la distinción se hace entre el desgaste seco, desgaste de la lubricación límite y desgaste abrasivo (Rabimowicz, 1965).

Existe literatura que clasifica los tipos de desgaste según el daño que causa y los efectos que lo producen, de esta manera se habla de desgaste abrasivo, desgaste erosivo, desgaste adhesivo, desgaste micro-oscilatorio y fenómenos como la corrosión y la fatiga superficial, se incluyen también otros mecanismos que surgen de la combinación de otros tal es el caso de la cavitación-erosión y el erosión-corrosión.

El Desgaste Abrasivo se produce por la interferencia entre los picos de las micro irregularidades de las dos superficies en contacto. Es el desgaste producido por partículas duras que penetran en una superficie ocasionando deformación plástica y/o desprendiendo virutas.

El Desgaste Erosivo se produce cuando una partícula abrasiva se pone en contacto con la superficie, impulsada por un fluido en la que está en suspensión. Dicho fluido puede ser líquido o gaseoso.

La diferencia entre Erosión y Abrasión debe ser mencionada, porque el término erosión ha sido relacionado con situaciones, que sería mejor clasificarlas como abrasión. La erosión por partículas sólidas se refiere a una serie de partículas que golpean y rebotan en una superficie, mientras que la abrasión resulta del deslizamiento de las partículas abrasivas a través de la superficie, bajo la acción de una fuerza externa aplicada.

La Corrosión ocurre como resultado de una reacción superficial de muchos metales con el medio ambiente, en donde se crean películas superficiales. Usualmente estas películas son muy duras y crean una protección sobre el material; luego el espesor de las mismas crece excesivamente y se vuelven frágiles y propensas a ser removidas.

La Fatiga Superficial se produce por la aplicación reiterada de cargas que producen tensiones sobre las capas superficiales. La fatiga superficial crea fisuras sobre las mismas; cuando estas fisuras se propagan, se desprende el material.

1.5.4.- Abrasión.

1.5.4.1.-Definición.

LA Abrasión, según la ASTM (AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS), "se origina por partículas o protuberancias duras que son forzadas una contra otras y se mueven a lo largo de una superficie sólida", y se define como "el daño a una superficie sólida que implica generalmente la pérdida progresiva de material y es debido al movimiento relativo entre la superficie y una o varias sustancias en contacto".

La velocidad de abrasión depende de 4 Factores:

- La característica de cada una de las superficies.
- La presencia de abrasivos entre ellas.
- La velocidad de contacto.
- Condiciones ambientales.

1.5.4.2.- Clasificación del Desgaste Abrasivo.

El fenómeno abrasivo se clasifica fundamentalmente de acuerdo al tipo y al ambiente de contacto. Debido al tipo de contacto la abrasión se divide en:

- Contacto de dos cuerpos, ocurre cuando el abrasivo se desliza a lo largo de una superficie, También se le llama abrasión por baja presión.
- Contacto de tres cuerpos, ocurre cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies. También se le llama abrasión producida por alta presión.

La clasificación debido al ambiente de contacto es como sigue:

- Abiertos.
- Cerrados.

Se dice que existe abrasión de baja presión cuando el abrasivo permanece relativamente intacto, así mismo se reconoce un fenómeno de abrasión por alta presión cuando el abrasivo o la partícula atrapada es triturado. También existe otro tipo de abrasión denominada por arranque, que se basa en que una partícula abrasiva relativamente grande deberá cortar el material que ha sido completamente endurecido por trabajo en frío, a causa de cualquiera de los fenómenos anteriores.

A causa de esto se han propuesto varios mecanismos para explicar como el material es removido de la matriz durante el proceso abrasivo, los cuales consideran fatiga, fractura y fusión. En la **Figura 1.12** se aprecia lo que sucede cuando la punta de un abrasivo entra en contacto con una superficie.

El Arado ocurre cuando se desplaza material de una muesca a los lados, generalmente se presenta bajo cargas ligeras y trae como consecuencia pérdida real del material, los daños se producen cerca de la superficie del material en forma parecida a lo que ocurre en un trabajo en frío. Si posteriormente se produce el rayado sobre la superficie trabajada en frío, entonces la pérdida de material deberá estar a cargo de la **Microfatiga**.

El Corte es la forma más severa de desgaste para materiales dúctiles, ya que la punta del abrasivo remueve una viruta parecido a como lo haría una herramienta de maquinado lo que conlleva a una pérdida de material pero con poca remoción de material en comparación con el tamaño de muesca. Para una partícula abrasiva (de forma angular) existe un ángulo crítico para el cual ocurre el proceso de transición entre el arado y el corte, que depende del material que está sometido a abrasión, por ejemplo el ángulo varía de 45° para el Cu a 85° para el Al (SEDRIKS, 1984). Para materiales dúctiles los mecanismos observados fueron el arado, la formación de bordes, y el corte; en cambio para materiales frágiles se observa un mecanismo

adicional: la microfRACTURA, la cual ocurre cuando las fuerzas aplicadas por el abrasivo exceden la tenacidad de fractura del material, este mecanismo de desgaste severo es el predominante en materiales cerámicos y activo en materiales tales como fundiciones blancas.

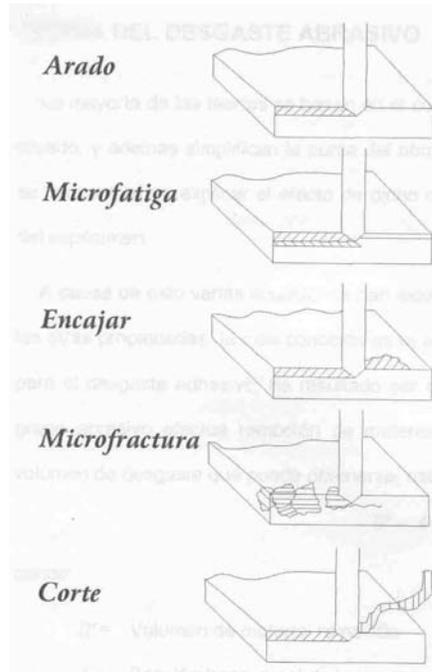


Figura 1.12 Procesos de Abrasión.

1.5.4.3.- Teoría del Desgaste Abrasivo.

La mayoría de las teorías se basan en el concepto de que la abrasión es el proceso de rayado, y además simplifican la punta del abrasivo como un cono anguloso. Por lo tanto, se concentran en explicar el efecto de dicho cono deslizándose a través de la superficie del espécimen.

A causa de esto varias ecuaciones han sido derivadas para correlacionar el desgaste y las otras propiedades, la más conocida es la ecuación de Archard (ASM HANDBOOK, 1994), si bien fue deducida para el desgaste adhesivo, ha resultado ser muy útil en desgaste abrasivo. Cuando un grano abrasivo efectúa remoción de

material de una superficie por corte, el máximo volumen de desgaste que puede obtenerse, está descrito por:

$$W=A*d \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde:

W = Volumen de material removido.

A = Sección transversal de la ranura.

d = Distancia de desplazamiento.

Al mismo tiempo, la sección transversal de la ranura, depende de la forma del grano abrasivo representado por el factor k_1 y de profundidad de penetración p . A su vez la profundidad de penetración es función de la carga aplicada L , la dureza del material H , y nuevamente de la forma del grano abrasivo, representado por k_2 . Dando como resultado, luego de reducir términos, que la ecuación de Archard sea igual a:

$$W = k_3 * \frac{(L*d)}{H} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Siendo k_3 una constante que engloba las otras. Cabe destacar que existen muchos factores que afectan a k_1 , por ejemplo que estemos en presencia de corte o arado, el abrasivo puede deslizar y evitar el desgaste, por derrumbamiento puede no ser efectivo, durante el final de su trayectoria de contacto, etc.

Generalmente un material posee buena o mala resistencia al desgaste cuando este se refiere al recíproco del volumen desgastado, siendo este:

$$R = 1/W \quad \text{Ecuación 1.3}$$

La ecuación de Archard, con pequeñas modificaciones es aún ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más completas.

1.5.4.4.- Propiedades del Material sobre el Desgaste Abrasivo.

Se ha demostrado tanto teórica como experimentalmente que la dureza del material se correlaciona con su velocidad de abrasión. Según Khrushchov (ASM HANDBOOK, 1994) existe una relación inversa entre la velocidad de abrasión y la dureza de materiales puros recocidos, también ensayó aceros de dureza variable, obteniendo una relación linealmente inversa al desgaste abrasivo. Generalmente la superficie de un material es endurecida por trabajo en frío hasta niveles elevados durante el proceso de abrasión. Richardson (ASM HANDBOOK, 1994) investigó el endurecimiento por arado de un grupo de metales puros y aceros, encontrando que la abrasión produce una alta dureza similar a la generada durante el proceso de taladrado.

Varios investigadores han detectado que la estructura y la orientación cristalina afectan al proceso de desgaste, por ejemplo, Alison^(ASM HANDBOOK, 1.994) demostró que los metales cúbicos se desgastan dos veces más rápido que los metales hexagonales, lo que le llevó a atribuirle a los metales hexagonales menor velocidad de endurecimiento. Steijn (STEIJN, R. P. 1984) estudió el desgaste de monocristales en función de su orientación cristalina, y llegó a la conclusión de que los metales BCC y FCC, con superficies preparadas en el plano (001), presentaban un desgaste mayor a lo largo de la dirección $\langle 100 \rangle$ que en la dirección $\langle 110 \rangle$.

Tanto la microestructura del material, como los elementos que se le adicionan al mismo, son factores importantes en el proceso abrasivo, ya que dependiendo de éstas el material resistirá con mayor o menor fuerza al proceso abrasivo.

Existe una relación relativa entre las partículas y el tamaño del grano abrasivo vital:

Mientras más grande sea el tamaño del grano abrasivo, el desgaste tiende a ser mayor. A causa de esto, a la matriz se le adicionan partículas cuyos factores suministran una mayor protección contra el desgaste. Los factores que afectan fundamentalmente al desgaste abrasivo de los materiales como se pueden observar en la **Figura 1.13** son:

Factores que Afectan las Pérdidas por Abrasión:

- Orientación ya que si la segunda fase de refuerzo es paralela a la superficie, es removida más fácil que una que tuviera la orientación perpendicular a la misma.
- Tamaño. Si el tamaño de la segunda fase es relativamente pequeño en comparación con la profundidad de la muesca abrasiva, esta segunda fase tendrá muy poco efecto o ninguno para resistir al fenómeno abrasivo.
- Módulo de Elasticidad: Si las partículas de refuerzo poseen un bajo módulo de elasticidad, la matriz tenderá a desunirse en la interface, lo que conllevaría aun desprendimiento de las partículas.
- Dureza Relativa y Fragilidad de la Segunda Fase; Los materiales frágiles tienden a agrietarse y desprender virutas en un área mayor que la sección transversal del grano abrasivo que está desprendiendo material.

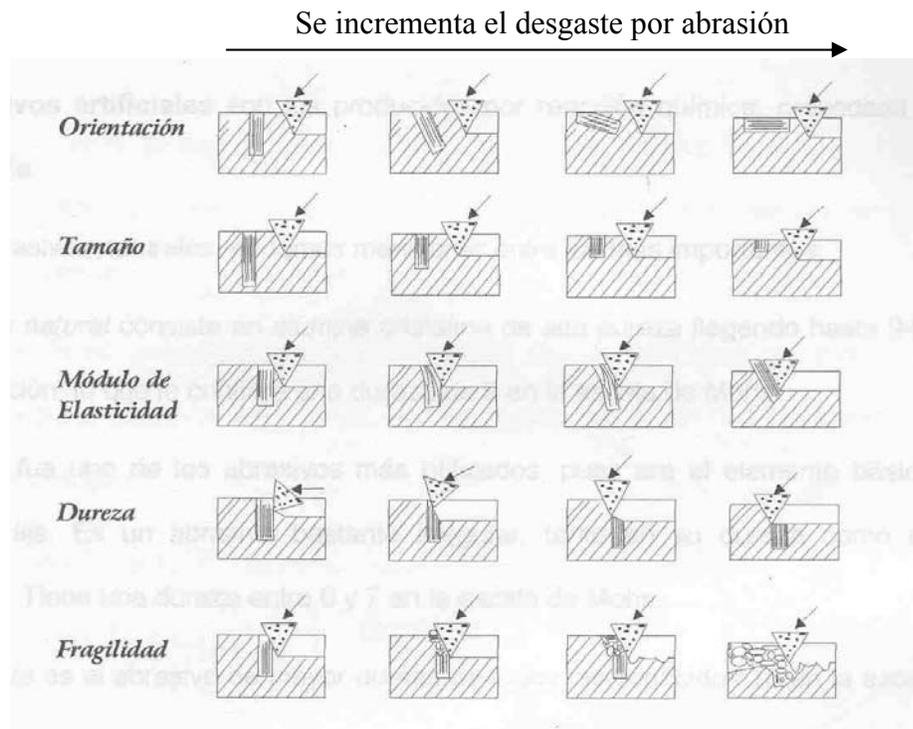


Figura 1.13 Factores que afectan las pérdidas por abrasión.

1.5.4.5.- Abrasivo.

Los abrasivos son los cuerpos que, por su elevada dureza y su estructura cristalina producen un desgaste o corte, por acción mecánica sobre materiales menos duros que ellos. Bajo esta denominación pueden agruparse gran cantidad de materiales, puesto que en la naturaleza siempre habrá uno de menor dureza que otro y por tanto susceptible de ser "desgastado" por éste.

Los abrasivos que se utilizan en la industria, los podemos clasificar como:

- Abrasivos naturales son los que se encuentran en la naturaleza.
- Abrasivos artificiales son los producidos por reacción química, provocada en la industria.

De los abrasivos naturales, podemos mencionar entre los más importantes:

Coridón natural consiste en alúmina cristalina de alta pureza llegando hasta 94% de concentración, lo que le confiere una dureza de 9 en la escala de Mohs.

Cuarzo fue uno de los abrasivos más utilizados, pues era el elemento básico del papel de lija. Es un abrasivo bastante irregular, tanto en su dureza como en su estructura. Tiene una dureza entre 6 y 7 en la escala de Mohs.

Diamante es el abrasivo de mayor dureza de todos los conocidos, posee una dureza de 10 en la escala de Mohs.

Esmeril esta compuesto de alúmina (35 a 70%), silicio y óxido de hierro. Su dureza varia según su composición, pero podemos situarla alrededor de 8 en la escala de Mohs.

Oxido de aluminio la dureza es de 9 en la escala de Mohs.

Dureza y Medición.

Una de las características básicas de todo abrasivo es su dureza y que todo material raya a otro siempre que sea más duro; a lo que se debe añadir que efectuará mejor su función cuando además de ser más duro tenga también una forma y estructura adecuadas.

Para determinar la dureza de los materiales, el hombre ha ideado diversos métodos, desde los ordinales más sencillos hasta otros que dan valores relativos en función de unas condiciones determinadas de antemano.

En 1812 el físico Mohs estableció la escala de dureza que lleva su nombre y que consiste en ordenar los materiales que en ella aparezcan, de forma que cada uno de ellos raya al que le precede.

Tabla 1.2 Comparación entre escala Mohs y Knoop.

Material	Escala Mohs	Escala Knoop
Talco	1	12,3
Yeso	2	61
Calcita	3	141
Fluorita	4	181
Apatita	5	483
Vidrio	6	621
Cuarzo	7	788
Topacio	8	1190
Coridon	9	2200
Diamante	10	8200

En la **Tabla N° 1.2** se presenta la escala de Mohs, en la cual cada material utilizado es rayado por el siguiente; por tanto cuanto más alto es el número de la escala, más duro es el material. No obstante, como antes se ha dicho, la escala de Mohs establece un orden de durezas, pero no indica cuantas veces es más duro un material con respecto al otro.

Para determinar el valor absoluto de la dureza de un material abrasivo cualquiera se utilizará la escala de Knoop (ver **Tabla 1.2**), de concepción más

moderna y que parte del esfuerzo de rallado que ejerce el diamante sobre cada material.

La medición de la dureza no sólo se aplica a los materiales abrasivos, sino a cualquier tipo de material, existen diversos métodos los cuales pueden ser clasificados en:

Método de Rayado.

El método de rayado se basa en la resistencia que opone un material a ser rayado por otro y es el que se ajusta al más puro concepto de dureza.

Método de Penetración.

Los métodos de penetración consisten en producir una huella en el material a ensayar, aplicando un penetrador a una determinada presión, hallándose el índice de dureza en función de la presión ejercida y la profundidad o diámetro de la huella dejada por dicho penetrador. Los métodos de medición de durezas por penetración son de mayor utilización en la práctica y son los conocidos métodos de Brinell, Rockwell y Vicker.

Método de Rebote.

En la medición de la dureza por rebote se utiliza el denominado método Shore, que determina la dureza de un material en función de la altura que alcanza al rebote un cuerpo de masa determinada dejándolo caer desde una altura fija sobre la superficie del material a ensayar. De todos los métodos éste es el único que no produce ninguna señal en el material a ensayar. En la medición por el método Shore se emplean dos escalas (A y D) en función de la dureza del material a medir; así para materiales blandos, caucho sobre todo, se usa la escala A y para materiales duros la escala D.

En fin se puede decir que la tenacidad, o resistencia a la ruptura del abrasivo es un factor importante, ya que la pérdida del material aumenta a medida que aumenta la tenacidad del abrasivo.

Granulometría.

Todos los abrasivos, una vez sacados del horno en forma de bloques o extraídos de los yacimientos naturales, se reducen a granos por medio de máquinas trituradoras, de las cuales salen en diversas dimensiones que requieren una clasificación por tamaño. El sistema de clasificación es distinto según sea el volumen de dicho grano: se emplea un procedimiento basado en tamices en los granos más bastos y un sistema de decantación en los más finos. En el primer caso, el tamaño del grano viene indicado por el número de mallas por pulgada lineal que tiene el tamiz empleado para su clasificación. Así un tamiz que tenga 12 mallas por pulgada será un grano número 12, mientras que uno que tenga 24 mallas por pulgada lineal, será indicado por el número 24, es decir, cuanto más grande sea el número de grano, tanto más pequeño será el molido.

El método de tamices es el empleado para clasificar granos comprendidos entre los números 8 al 240. A partir de 240 se utiliza el sistema de decantación, el cual está basado en que las partículas abrasivas suspendidas en un líquido se depositan en el fondo a distinta velocidad según su tamaño, lo que permite diferenciarlos por tamaños.

Forma.

Este es un factor muy importante en el fenómeno de desgaste, ya que afecta la forma de la huella producida en el material, al igual que la carga de contacto y la transición entre el contacto elástico y plástico. De manera experimental se ha demostrado que a medida que el abrasivo presente forma redondeada en vez de angular, el desgaste ocurrido es menor.

Temperatura.

Es de esperarse que la rata de desgaste abrasivo aumentase a medida que aumenta la temperatura, ya que la dureza y el esfuerzo de fluencia disminuyen, sin embargo, según Richarson (ASM HANDBOOK, 1994) existen indicios, por ejemplo para el Cu y el Al, que experimentalmente a medida que aumenta la temperatura a 673 K, se observa muy pocos cambios en el proceso de desgaste abrasivo.

Velocidad de Contacto.

Al igual que en el caso anterior, el estudio fue realizado de manera experimental, la velocidad de desgaste abrasivo se ha encontrado que aumenta ligeramente cuando la velocidad aumenta entre el rango de 0 a 2,5 m/seg. Este aumento puede ser atribuido al calentamiento por fricción que ocurre en la superficie del material.

Carga.

Según la ecuación de Archard el desgaste abrasivo es proporcional a la carga aplicada; sin embargo, esta proporcionalidad no se cumple cuando la carga es lo suficientemente alta para fracturar e incluso romper las partículas abrasivas. Debido a esto se pueden enunciar dos casos:

- La fractura del abrasivo puede provocar nuevos puntos agudos que favorezcan al desgaste.
- La fractura del abrasivo puede provocar partículas redondeadas que desfavorezcan al desgaste abrasivo.

Humedad.

El efecto de la humedad atmosférica sobre el desgaste abrasivo no está del todo claro, a causa de encontrarse resultados experimentales contradictorios. Larsen-Basse (LARSEN, J., BASSE, 1975) estudiaron como la humedad afectaba a una variedad de metales puros y aceros, usando como abrasivo Carburo de Silicio (SiC),

encontraron que se favorecía al desgaste en un 65%, a causa de la formación de bordes agudos como resultado de la fractura asistida por la humedad del SiC. En cambio Mercer (MERCER, 1985) llegó a un resultado distinto: al aumentar la humedad, el desgaste disminuyó para fundiciones y aceros de medio carbono, en el caso del titanio, éste permaneció constante y aumentó si el material base es cobre.

Efectos Corrosivos.

El fenómeno abrasivo es a menudo incrementado por las condiciones corrosivas encontradas en el lugar, especialmente si el PH reinante es bajo. En este caso se presenta un fenómeno de sinergismo entre el desgaste abrasivo y la corrosión, ya que la abrasión crea superficies frescas que rápidamente se corroen y la capa corroída es removida por el fenómeno abrasivo dejando así una superficie libre para volver a empezar el ciclo.

1.5.4.6.- Materiales Resistentes al Proceso Abrasivo.

No existe una ciencia como tal que seleccione los materiales resistentes al desgaste abrasivo. Normalmente existen materiales típicamente duros con una buena resistencia a la abrasión los cuales se presentan a continuación.

Materiales Cerámicos.

Varios cerámicos presentan una resistencia a la abrasión excelente, a causa de su gran dureza relativa respecto de la partícula abrasiva. Sin embargo su punto débil es su incapacidad a soportar impactos, lo que significa que a altas cargas unitarias los materiales cerámicos presentan microfracturas que conllevan a altas tasas de desgaste; es decir que poseen una baja tenacidad.

Entre los principales materiales cerámicos utilizados en la industria podemos nombrar a la alúmina, zirconia y el nitruro de silicio, ya que los mismos tienen excelentes propiedades frente al proceso abrasivo. Se puede decir que el uso de estos

materiales se verá incrementado cuando tanto sus precios como sus limitaciones disminuyan.

Metales.

Son los más utilizados, debido a su capacidad para soportar un uso indebido durante su vida útil. Las características fundamentales para seleccionar un material metálico que va a trabajar frente al desgaste abrasivo son las siguientes:

- Presentar alta dureza.
- Materiales con aleaciones de metales formadores de carburos; ya que estos tienden a aumentar la resistencia a la abrasión.
- Metales con adiciones de carburos con un tamaño de grano mayor que el abrasivo.

Las fundiciones base hierro blancas aleadas son las más resistentes a la abrasión, en su familia podemos incluir a las fundiciones blancas con alto porcentaje de carbono, al cromo-molibdeno, al cromo-níquel, y las fundiciones blancas perlíticas. La razón principal de resistir más a la abrasión se debe a que existe formación de carburos durante el proceso de solidificación, pero al igual que los materiales cerámicos, tienen una resistencia al impacto limitada en comparación con los aceros, son difíciles de maquinar y soldar, lo que limita su uso en la industria.

Con respecto a los aceros de baja aleación, la resistencia a la abrasión es básicamente en función de su dureza y de su contenido de carbono, pero cabe recalcar que otras adiciones contribuyen a aumentar la dureza y otras propiedades mecánicas del material base.

Plásticos.

Los mismos poseen menor resistencia al desgaste abrasivo a medida que la relación entre la dureza y el módulo elástico disminuye. Por otra parte, estudios realizados han demostrado que existe una gama de plásticos que poseen un aumento

en su resistencia al desgaste abrasivo a medida que su peso molecular aumenta, este es el caso de los termoplásticos y los termo-endurecidos. Los cuales están siendo utilizados en manejo de emulsiones abrasivas y emulsiones o componentes químicos.

1.5.4.7.- Ensayos Abrasivos Normalizados.

Dependiendo de la norma, existen ensayos que determinan la resistencia de un material frente al desgaste abrasivo, pero en solamente estudiaremos los presentados por la ASTM:

I. **.D 1242** Test of abrasion of plastic by loose abrasive or abrasive bonded to cloth or Paper.

El cual consiste en desgastar probetas de plástico con una banda de óxido de aluminio con el fin de saber como se comportan los distintos tipos de plásticos frente al desgaste abrasivo. Nótese en el dibujo que no es una sino varias probetas que van girando luego de ser raspadas, esto debe a que hay que bajar la temperatura de las probetas para evitar posibles cambios en la estructura del material, a causa de no resistir altas temperatura que pudieran ser generadas en el ensayo. Los resultados se reportan en pérdida de volumen.

II. **G 65** Dry sand rubber wheel test of metals for scratching abrasion (ver **Figura 1.14**).

Consiste en desgastar una probeta con arena de sílice, la prueba consiste en hacer caer la arena entre la probeta y una rueda de goma de clorobutilo la que está ejerciendo una fuerza sobre el espécimen ayudado de un brazo multiplicador de fuerzas. El desgaste se reporta en pérdida volumétrica del material ensayado (mm³).

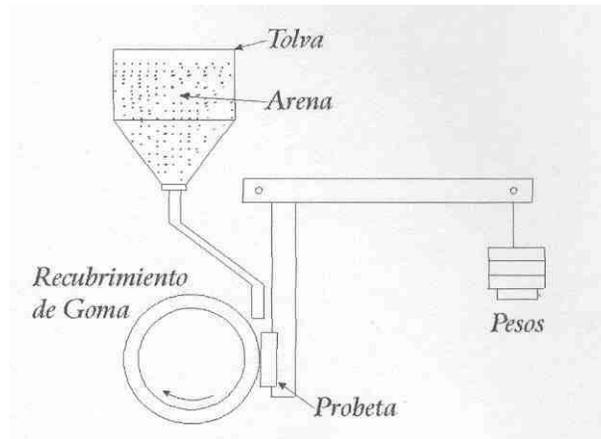


Figura 1.14 Máquina de Desgaste Abrasivo según Norma ASTM G 65.

III. G 105 Conducting Wet Sand I Rubber Wheel Abrasion Test.

Al igual que la prueba G 65, consiste en desgastar una probeta con arena de sílice ayudado con una rueda recubierta con una goma, en este caso de neopreno, la particularidad de este ensayo es que la arena no cae ni es seca como en el caso antes mencionado, sino que esta vez la arena es húmeda, mezclada con una cantidad específica de agua y ubicada en un contenedor la cual es arrastrada por la goma, gracias al brazo multiplicador de fuerzas es empujada sobre la probeta causando de esta forma el desgaste abrasivo. Se reporta la pérdida del material en forma volumétrica (mm^3).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1.- Caracterización de las muestras.

2.1.1.- Materiales Utilizados.

Material Base.

Se utilizó como material base para todas las muestras Acero al Carbono AISI 1020.

Capa Intermedia. Cobre -Aluminio.

Se utilizó una aleación una aleación de 70% Cobre y 30% Aluminio para ser aplicada como base entre el substrato y el recubrimiento. El fabricante de la aleación recomienda usar este tipo de bases, para obtener mayor adherencia en los recubrimientos rociados.

Recubrimientos.

Para la aplicación de los recubrimientos se utilizó una aleación de Babbitt SAE 12, cuya composición se muestra en la **Tabla 2.1**, el cual se seleccionó por ser este el de mayor aplicación en los recubrimientos de cojinetes, debido sus buenas características mecánicas tales como presentar altas resistencias a cargas unidireccionales, mínima lubricación con fluidos de baja viscosidad, aplicaciones poco limpias y en árboles o ejes de distintas maquinas.

Tabla 2.1 Composición química del Babbitt SAE 12.

Estaño (Sn)	Antimonio (Sb)	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)
89%	7,5%	3.25%	Trazas

2.1.2.- Geometría de las muestras.

Las muestras fueron elaboradas con geometría y dimensiones normalizadas, específicamente requeridas para el ensayo de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65. Estas son de forma rectangular de 25 x 75 mm y de 4mm de espesor. El tamaño puede variar de acuerdo a las necesidades del usuario con las restricciones de que la longitud y el ancho deben ser los suficientes para mostrar la total longitud y el ancho de la huella de desgaste de acuerdo a lo que se desarrollo en la probeta.

2.1.3.- Número de muestras.

Un total de 90 prismas rectangulares que fueron rociadas por arco eléctrico con diferentes parámetros de deposición. En la **Tabla 2.2** se muestra de manera condensada la distribución de las muestras para cada ensayo.

Tabla 2.2 Distribución de muestras.

Parámetros	Ensayo de Desgaste			Microdureza
	3 seg.	15 seg.	30 seg.	Microscopía.
120Amp-310KPa (45Psi)	3	3	3	1
120Amp-380KPa (55psi)	3	3	3	1
120Amp-450KPa (65psi)	3	3	3	1
180Amp-310KPa (45psi)	3	3	3	1
180Amp-380KPa (55psi)	3	3	3	1
180Amp-450KPa (65psi)	3	3	3	1
250Amp-310KPa (45Psi)	3	3	3	1
250Amp-380KPa (55psi)	3	3	3	1
250Amp-450KPa (65psi)	3	3	3	1
Sub Total	27	27	27	9
Total 90				

2.2.- Procesos.

Las muestras fueron distribuidas en nueve (9) grupos de diez (10) unidades, con la finalidad de preclasificarlas para realizar los recubrimientos. Esto se logró colocándolas sobre una perfil de Acero 1020 y fijándolas por medio de soldadura. Dicho perfil sirve de porta-probetas para facilitar la manipulación de los grupos y para depositar material de Babbitt necesario para calcular las diferentes densidades del recubrimiento para cada condición de operación. En la **Figura 2.1** se muestra dicha distribución.



Figura 2.1 Distribución de las muestras en el porta-probetas.

2.2.1.- Preparación de la superficie de las muestras.

La adherencia de los recubrimientos rociados se crea principalmente por un enlace mecánico con la superficie del substrato. Al contar con este enlace mecánico entre las partículas rociadas y la superficie del substrato, la preparación de la superficie juega un papel muy importante para obtener un recubrimiento exitoso, pues la limpieza y la rugosidad afectan enormemente las fuerzas de enlace entre el recubrimiento y el substrato. A continuación se explica con detalle como se realizó la preparación de las superficies, para mayor comprensión del proceso.



La superficie de la pieza de trabajo, se limpió con Tinner para remover la grasa o cualquier otro contaminante que pudiera impedir la adhesión del recubrimiento al sustrato. (Ver **Figura 2.2**)

Figura 2.2 Limpieza con rociado de Tinner.

Luego se secaron las probetas con una llama oxiacetilénica, durante un tiempo de 20 segundos aproximadamente, para así eliminar la humedad de las muestras.



Para darle la rugosidad adecuada a las muestras, éstas fueron atacadas, utilizando partículas de óxido de aluminio a una presión de 90 Psi y una distancia de 20-25cm y durante 1 minuto aproximadamente. Esta operación se llevó a cabo dentro de una cámara de Blasting. (ver **Figura 2.3**)

Figura 2.3 Cámara de Blasting.

Para verificar que se generó la rugosidad deseada, se tomaron medidas de ésta sobre toda la superficie de las probetas, utilizando un rugosímetro. (Ver **Figura 2.4**).



Figura 2.4 Medida de Rugosidad.

Se aplicó una capa de Vinilo en las superficies de la base metálica donde no se desea que el recubrimiento se adhiriera, para luego ser removido con mayor facilidad sin destruir la capa formada.



Figura 2.5 Probetas con capa de adherente.

Se aplicó una capa de adherente sobre la superficie de las probetas, una aleación 70% Cobre y 30% Aluminio. Ésta se aplicó por medio del proceso de arco eléctrico utilizando los parámetros de la **Tabla 2.3**. (ver **Figura 2.5**).

Tabla 2.3 Parámetros de proceso de capa de adherencia.

Presión de atomización	310KPa (45 Psi.)
Corriente	200 Amp.
Voltaje	30 Vol.
Distancia de rociado	200mm
Calibre del alambre	1.6mm

2.2.2.- Proceso de Rociado Térmico por Arco Eléctrico.

Los recubrimientos de Babbitt se depositaron variando los parámetros de operación del proceso (Corriente-Presión de Atomización), para determinar su influencia sobre las propiedades del recubrimiento. Los procesos se totalizaron en 9 corridas, que es la conjugación de un modelo factorial de 3^2 (2 parámetros-3niveles). En la **Tabla 2.4** se observa en detalle los parámetros de operación utilizados para depositar los recubrimientos de Babbitt.



Figura 2.6 Panel de control del equipo de arco eléctrico.



La **Figura 2.7** muestra el proceso de deposición realizado en la Planta PLASMATEC, Ingenieros S.A., con un equipo de arco eléctrico semi-automatizado el cual asegura que todos los procesos mantengan constantes la distancia y velocidad de desplazamiento de la pistola.

El espesor de los recubrimientos obtenidos osciló entre 1,2-1,4 mm para todas las condiciones.

Tabla 2.4 Parámetros de deposición de los procesos de rociado térmico por Arco Eléctrico.

Corrida	Corriente del Arco eléctrico (Amp)	Presión de Atomización (KPa)	Distancia de Rociado (mm)	Temperatura de Proceso (°C)
1	120	310	200	100
2	120	380	200	100
3	120	450	200	100
4	180	310	200	110
5	180	380	200	110
6	180	450	200	110
7	250	310	200	120
8	250	380	200	120
9	250	450	200	120

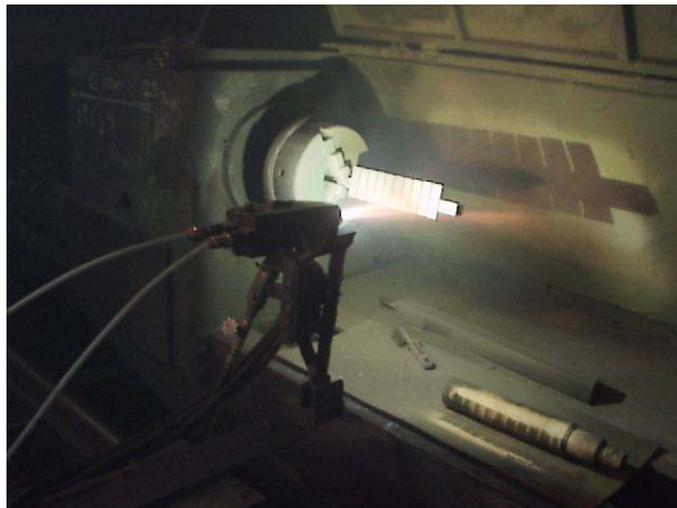


Figura 2.7 Proceso de rociado térmico por arco eléctrico semi-automatizado.

2.2.3.- Mecanizado de las piezas.

Una vez finalizado el proceso de deposición, las probetas fueron rectificadas para lograr un acabado superficial exigido por la norma ASTM G-65 ($0,8 \mu\text{m}$ o menos) para realizar los ensayos de desgaste abrasivo. En este proceso las probetas rociadas con Babbitt fueron mecanizadas con una máquina Fresadora, utilizando una herramienta de Acero Rápido recomendada por los técnicos de la Empresa Plasmatec Ingenieros S.A.(ver **Figura 2.8**). En la **Tabla 2.5** se muestran los parámetros utilizados para realizar este proceso.

Tabla 2.5 Parámetros de proceso de mecanizado de probetas rociadas.

Herramienta	R.P.M.	Vel. de Avance	Mecanizado
Fresa Acero Rápido	2000	0.001 m/s	0.5 mm

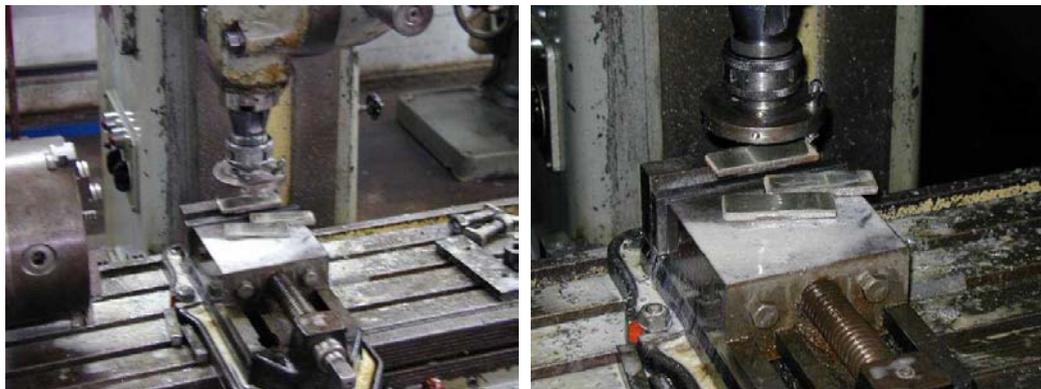


Figura 2.8 Proceso de mecanizado de las probetas, máquina fresadora.

2.3.- Ensayos Realizados.

2.3.1.- Preparación Metalográfica.

Para realizar un correcto análisis microestructural de los recubrimientos depositados por rociado térmico, se debe tener especial cuidado a la hora de realizar cada paso de la preparación Metalográfica. Varios métodos son utilizados para evaluar las características de estos tipos de recubrimientos, pero el examen metalográfico suministra la información acerca de las diferentes características de los recubrimientos. Cualquier paso que se lleve a cabo indebidamente durante el proceso de preparación metalográfica puede producir potencialmente una falsa o incorrecta información de las características del recubrimiento.

Inicialmente las muestras fueron cortadas transversalmente utilizando un disco de carburo de silicio de 9 pulgadas (**Figura 2.10**) en un equipo de cortar marca BUHLER ABRASIMENT 2 (**Figura 2.9**) y refrigeradas con aceite recomendado por el fabricante. El corte se realizó exponiendo el recubrimiento a compresión para así evitar un posible desprendimiento del mismo.



Figura 2.9 Cortadora Buhler.



Figura 2.10 Disco de cortadora.

Seguidamente se procede a embutir en frío todas y cada una de las muestras en una resina plástica, con el fin de facilitar la manipulación de las mismas a la hora de realizar el pulido. Cabe destacar que se realizó el embutido “frío” para no alterar en ningún momento la estructura del material por calentamiento y presión. Las muestras se pulieron siguiendo los procesos mostrados en la **Tabla 2.6**.

Tabla 2.6 Pulido de las Muestras.

Proceso	Material	Granulometría	Tipo de paño	Lubricante
Desbaste Grueso	Cintas Abrasivas de SiC	120 grit	–	Agua
Esmerilado fino	Papeles Abrasivos de SiC	120-600 grit	–	Agua
Pulido Grueso	Papeles Abrasivos de SiC	600-2400 grit	pelo pequeño	Agua
Pulido Final	Suspensión de Alumina	0,03-0,05 micras	pelo mediano	Alumina-Agua



Figura 2.11 Pulidora Buhler.

2.3.2.- Microscopía Electrónica de Barrido.

La microestructura fue analizada mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), con un equipo marca Phillips XL-Series (ver **Figura 2.12**), acoplado con el Espectrómetro de Dispersión de Energía de Rayos X (EDRX9, y Hardware EDAX DX-4).



(a)



(b)

Figura 2.12 Equipo Usado para realizar la microscopía. (a) De izquierda a derecha; Espectrómetro de dispersión de Rayos X, Analizador de Imágenes, Microscopio Electrónico de Barrido, (b) Muestras embutidas listas para ser analizadas.

2.3.3.- Porosidad.

La porosidad de los recubrimientos que se les realizó MEB, fue estudiada mediante técnicas de análisis de imágenes en el equipo de microscopía electrónica, observando las zonas más oscuras y utilizando el hardware Image Análisis And Measured.

2.3.4.- Ensayo de microdureza Vickers.

La Microdureza Vickers efectuada en un Microdurómetro Marca Leitz Wetzlar 7520 (ver **Figura 2.13**), fue realizada sobre la sección transversal del recubrimiento pulido, bajo una carga de 50gr.

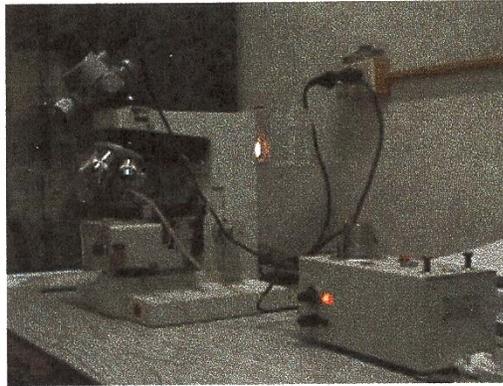


Figura 2.13 Microdurómetro Leitz Wetzlar 7520.

Las huellas fueron tomadas a lo largo y ancho de la superficie del área transversal de cada uno de los recubrimientos. Sus diagonales se midieron tomando un promedio de 8 improntas para luego determinar la dureza Vickers por medio de la siguiente ecuación (1).

$$HV = P \times 1,854/E^2 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Siendo HV la dureza Vickers obtenida en Kg/mm², P la carga aplicada en Kg., E₁ y E₂ las diagonales y E=(E₁+ E₂)/2 en mm.

2.3.5.- Ensayo de Desgaste Abrasivo.

La determinación de la resistencia al desgaste por abrasión se realizó bajo la norma ASTM G-65. Titulada “Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests”. El ensayo se realizó sobre 3 muestras por condición para cada tiempo de ensayo de desgaste. La forma y tamaño de las muestras, se seleccionó según la norma ASTM G-65, la cual señala que debe tener una geometría de prisma rectangular de 25 x 75 mm y de 4mm de espesor.

En la **Tabla 2.7** se puede observar la distribución del número de muestras por condición.

Tabla 2.7 Distribución del número de muestras para el ensayo de Abrasión.

Parámetros de termorrociado	Ensayo de Desgaste (tiempo de ensayo)		
	3 seg.	15 seg.	30 seg.
120Amp-310KPa	3	3	3
120Amp-380KPa	3	3	3
120Amp-450KPa	3	3	3
180Amp-310KPa	3	3	3
180Amp-380KPa	3	3	3
180Amp-450KPa	3	3	3
250Amp-310KPa	3	3	3
250Amp-380KPa	3	3	3
250Amp-450KPa	3	3	3
Sub Total	27	27	27
Total 81			

Síntesis del Ensayo.

La prueba de abrasión consiste en raspar una probeta estándar con una arena (abrasivo) de tamaño y composición controlados. El abrasivo se introduce entre la probeta y una rueda con un recubrimiento de goma (clorobutilo) de una dureza específica. La probeta se presiona contra la rueda, mediante un brazo multiplicador de fuerzas a un valor determinado mientras un flujo controlado de arena abrasiva raspa la superficie de prueba. La rotación de la rueda es tal que su cara de contacto se mueve en dirección del flujo de la arena. La duración de la prueba y la fuerza aplicada por la palanca varía según el procedimiento utilizado. Las probetas se pesan antes y después del ensayo y se registra la pérdida de masa. Es necesario convertir la pérdida de masa a pérdida de volumen en milímetros cúbicos, debido a las amplias diferencias en la densidad de los materiales. Fue necesario para este estudio realizar ensayos normalizados para hallar las diferentes densidades de los recubrimientos según su parámetro de deposición. La abrasión finalmente se reporta como pérdida volumétrica por procedimiento específico.

Procedimientos del Ensayo

Debido a la diversidad de materiales que se encuentran bajo el fenómeno de desgaste, la prueba cubre cuatro procedimientos recomendados que se ajustan a los grados específicos de resistencia de uso o espesor del material.

- Procedimiento **A**: Esta es una prueba relativamente severa, que alineará materiales metálicos en una escala que irá de menor a mayor resistencia a la abrasión. Es particularmente útil en materiales que van de media a extrema resistencia al proceso de desgaste abrasivo.
- Procedimiento **B**: Es una pequeña variación del Procedimiento A. Puede usarse en materiales con alta resistencia a la abrasión pero puede ser particularmente útil en la clasificación jerárquica de los materiales de medio a baja resistencia a la abrasión. Este procedimiento debe usarse cuando los valores de pérdida de volumen desarrollados por el Procedimiento A, Exceden los 100 mm³.
- Procedimiento **C**: También es una variación del Procedimiento A, pero es usado particularmente cuando el material a ensayar son recubrimientos delgados.
- Procedimiento **D**: Esta es una variación más ligera del Procedimiento A, particularmente es útil para alinear materiales de baja resistencia a la abrasión. También se usa en materiales de tipo genérico o materiales cuya pérdida de volumen sea muy cercana cuando se utiliza el Procedimiento A.

Descripción del Banco de Ensayo.

El banco de ensayo utilizado fue desarrollado por Pinto N. et. al., 1.999, el cual está constituido por los siguientes elementos:

-Rueda de Caucho: Están hechas con un disco de acero 1040 como base y una capa externa de caucho de clorobutilo (ver **Figura 2.14 (a)**), la cual tiene un diámetro de 228,6 mm (9pulg.) y deberá usarse hasta que el diámetro se desgaste hasta 215,9 mm

(8,5 pulg.). Ésta debe ser limpiada cada vez que se note alguna imperfección en su superficie.

-**Tobera de Arena:** Ésta se encarga de producir una rata de flujo de arena exacta y una forma apropiada de cortina de arena abrasiva para cubrir toda el área de contacto entre la Rueda y la probeta. La tobera debe producir una rata de flujo de arena de 300 a 400 gramos por minuto (ver **Figura 2.14 (a)**).



Figura 2.14 (a) Porta-probetas, Rueda de Caucho y Tobera de Abrasivo.

-**Sujetador de la Probeta y Brazo Multiplicador:** El sujetador de probeta se adhiere a una palanca a la que se añaden pesos de manera que se apliquen fuerzas a lo largo de la línea diametral horizontal de la rueda (ver **Figuras 2.14 (a) y (b)**) se debe disponer de un número apropiado de pesas, para aplicar la fuerza adecuada para los diferentes procedimientos (ver **Tabla 2.9**).



Figura 2.14 (b) Sistema brazo multiplicador con pesos.

- **Abrasivo:** El tipo de abrasivo es una arena de Sílice como se tipifica por la American Foundry Sand N° AFS 50-70 suministrada por fuente calificada (ver Anexos). El contenido de humedad no debe exceder del 0,5% de porcentaje en peso.
- **Motor Eléctrico:** El cual es un motor trifásico a 220 V de 1Hp, conectado a caja reductora, que impulsa la rueda de caucho a 200 ± 10 r.p.m..
- **Temporizador:** Éste controla el tiempo de prueba y detiene el equipo al transcurrir el tiempo preestablecido para la misma (ver **Figura 2.14 (c)**).



Figura 2.14 (c) Máquina de Ensayo, Panel de control con Temporizador.

Balanza Analítica: La balanza para medir la pérdida de masa de las probetas debe tener una apreciación de 0,001 gramos para los procedimientos A, B y D, para el procedimiento C es necesario utilizar una balanza con 0,0001 gramos de apreciación (ver **Figura 2.15**).



Figura 2.15 Balanza Analítica.

Des-Humidificación de la Arena Abrasiva.

Si la arena ha sido sometida a humedad, o a una continua humedad relativa alta, podría afectar los resultados de la prueba. Por consiguiente el contenido de humedad no deberá exceder el 0,5% de porcentaje en peso. El contenido de humedad se determinó midiendo la pérdida de peso después de calentar una muestra a 120° C (250° F) durante una hora. Presentando una pérdida de peso de 0,65% (ver cálculos en anexos), por lo que se procedió a secar la arena por medio de calentamiento a 100° C por una hora repitiéndose luego la prueba de humedad obteniendo un porcentaje de 0,4%, suficiente para realizar los ensayos. En la **Tabla 2.8** se observan los parámetros utilizados en este proceso.

Tabla 2.8 Parámetros del proceso de secado de la Arena Abrasiva.

Proceso	Temperatura del Horno	Tiempo de horneado	Porcentaje de pérdida en peso
Prueba de Humedad	120°C (250°F)	60 min	0,65%
Secado	100°C (212°F)	75 min	-
Prueba de humedad	120°C (250°F)	60 min	0,40%

Determinación de las Densidades de los Recubrimientos.

Para determinar la Densidad (ρ) del recubrimiento para cada una de las condiciones antes mencionadas, se realizó el método de inmersión bajo el siguiente procedimiento:

- Se desprendieron las muestras de material de Babbitt que fueron depositadas en el perfil porta-probetas (para cada condición), se secaron hasta obtener una masa constante, para esto se colocaron las muestras en una estufa a 60° C (la norma recomienda 150° C, pero se utilizó la menor temperatura posible para no alterar la disposición física de las muestras). Se determinó la masa seca, P_{seco} , con precisión de 0,01 gr.

- Se colocaron las muestras en un recipiente con agua destilada y se hirvieron por 1 hora, teniendo cuidado de que las muestras permanecieran cubiertas con Agua en todo momento. Después se permitió que las muestras permanecieran en el agua por 24h.
- Después de la impregnación de las muestras, se determinó el volumen de las muestras, $V_{\text{desplazado}}$. Con una precisión de 0,1 ml. en cada muestra mientras que estaban sumergidas en el agua. Esto se realiza colocando cierto volumen de agua destilada en un cilindro graduado, luego se introduce la muestra y se verifica el volumen desplazado con una precisión de 0,1 ml el cual será el volumen de la muestra, esto se realizó para cada una de las muestras.

Luego se calcula la densidad $\rho_{\text{recubrimiento}}$ en gr./cm^3 de cada recubrimiento con la relación, ecuación 2.2:

$$\rho_{\text{recubrimiento}} = P_{\text{seco}} / V_{\text{desplazado}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Procedimiento del Ensayo de Desgaste Abrasivo

A continuación se presenta el procedimiento paso a paso para la realización del ensayo de desgaste.

1. Se identificaron todas y cada una de las probetas con un código que especifica el número de probeta como a la condición que pertenece (ver tabla de masas en anexos).
2. Inmediatamente antes de pesar, se limpiaron cada una de las probetas con un solvente industrial (Tinner) y se secaron. Asegurando que se removiera todo sucio o materia extraña a la probeta.
3. Se pesaron todas las probetas en una balanza analítica digital con una precisión de 0,0001 gr.
4. Se seleccionó una probeta y se colocó en el soporte o porta-probetas de la máquina, se añadieron los pesos apropiados a la palanca para desarrollar la fuerza necesaria para este ensayo (ver **Tabla 2.9**).

5. Se verificó que el disco girara a 200 r.p.m. con un tacómetro.
6. Se colocó el temporizador en el tiempo requerido. Cabe destacar que las pruebas fueron realizadas incrementando los tiempos, es decir se realizaron todas las pruebas de 5 seg. luego las de 15 seg. y finalmente las pruebas de 30 seg. la cual es la prueba que corresponde al Procedimiento C de la norma.
7. Se verificó que la rata de flujo de arena abrasiva (Sílice) a través de la tobera estuviese entre 300 gr/min (0,66 lb/min) y 400 gr/min (0,88 lb/min). A la vez que se estableciera una cortina de arena uniforme.
8. Se accionó la rotación de la rueda e inmediatamente se bajó la palanca cuidadosamente para permitir que la probeta contactara con la rueda.
9. Al detenerse la rueda, se separó la probeta y se cerró el flujo de arena.
10. Se removió la probeta y se pesó de nuevo con una precisión de 0,0001 gr.
11. Se esperó un tiempo de descanso apropiado entre cada prueba que debe ser hasta que el disco de goma volviese a temperatura ambiente.

Nota: El procedimiento empleado para realizar dichas pruebas fue el estipulado por la norma ASTM G-65 como Procedimiento C, el cual indica que el tiempo de prueba debe ser de 30 segundos (1/2 min.) (ver **Tabla 2.9**), el cual se recomienda para recubrimientos delgados. Además se realizaron ensayos utilizando los tiempos de 5 y 15 segundos (conservando los demás valores de los parámetros), debido a la poca dureza del material de Babbitt el cual se comporta como de baja resistencia ante este tipo de prueba.

Tabla 2.9 Parámetros de la Prueba de desgaste.

Proced.	Fuerzas contra la Probeta	Pesos contra la probeta	Revoluciones de la rueda	Tiempo de la prueba
-	130 N (30 lb)	5,159 gr.	200 r.p.m.	5 seg.
-	131 N (30 lb)	5,159 gr.	201 r.p.m.	15 seg.
C	132 N (30 lb)	5,159 gr.	202 r.p.m.	30 seg.

Cálculos y Reportes de Resultados.

Cálculo de pérdida de masa:

Los resultados de las pérdidas por abrasión deberán reportarse como pérdida volumétrica en mm³ de acuerdo con el procedimiento utilizado en la prueba. Para convertir pérdida de masa a pérdida volumétrica se utilizó la siguiente ecuación 2.3:

$$PV = \frac{m}{\rho} * 1000 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

PV = volumen perdido (mm³)

m = masa perdida (gr.)

ρ = densidad del recubrimiento (gr./cm³)

Ajuste de pérdida de Volumen:

A medida que la rueda de goma disminuye en diámetro la cantidad de abrasión de raspado desarrollada en una práctica se reducirá en consecuencia. La pérdida de volumen real producida por estas ruedas es ligeramente más pequeña, por lo tanto será inexacta. El valor de “pérdida de volumen ajustada” toma esto en cuenta en indica la rata de abrasión real que se produciría por una rueda de diámetro de 228,6 mm. (9,00 pulg.). Se calculó la pérdida de volumen ajustada (PVA) con la siguiente ecuación (4):

$$PVA = PV * \frac{228,6 \text{ mm. (9,00 pulg.)}}{Dr} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

PVA = pérdida de volumen ajustada (mm³)

PV = volumen perdido (mm³)

Dr = diámetro de la rueda después de usada (mm)

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.- Microscopia Electrónica de Barrido.

La **Figura 3.1** corresponde a una foto micrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido tomada en la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt en base de Estaño, depositado mediante la técnica de Arco eléctrico con 120 Amperios y 310 KPa de presión de atomización. En esta figura puede observarse una estructura típica de este material, ya que al ser depositado, forma un recubrimiento bastante homogéneo en cuanto espesor. Dentro del recubrimiento son reveladas áreas oscuras, las cuales pueden tratarse de óxidos incluidos, pero la gran mayoría son poros. Esto fue determinado por medio de un análisis químico puntual realizado en las pequeñas zonas negras (ver **Figura 3.1 (b)**) con el equipo de energía dispersiva de rayos X (EDAX) acoplado al microscopio electrónico de barrido, del cual se obtuvo la gráfica en la **Figura 3.1 (c)**. Como se puede observar en este análisis el elemento principal es el Estaño, con bajo contenido de Antimonio y Cobre.

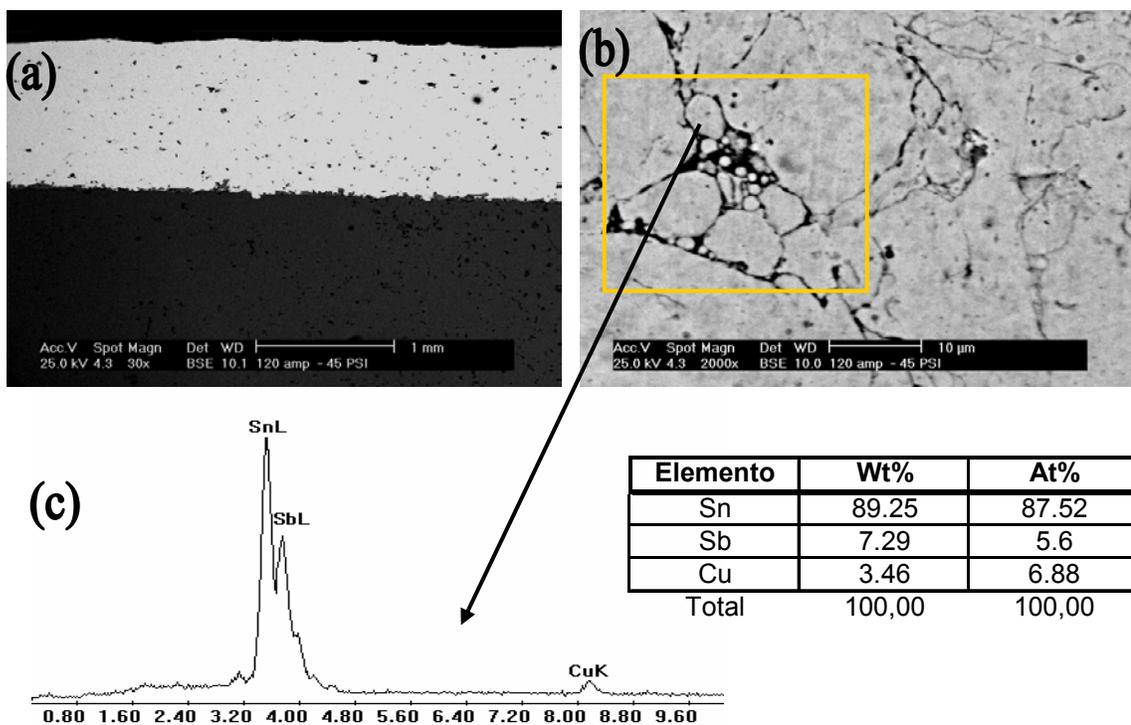


Figura 3.1 (a) MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, rociado con 120Amp-310KPa, 30X, (b) MEB de recubrimiento de Babbitt rociado con 120Amp-310KPa, .2000X, (c) Gráfica de análisis químico puntual (EDS).

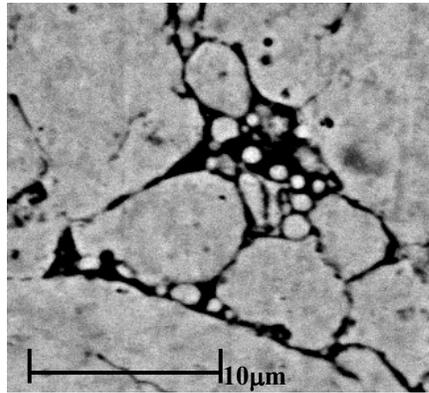


Figura 3.1 (d) Detalle; partículas no fundidas en recubrimiento rociado con 120Amp-310KPa.

En la **Figura 3.1 (d)** se observa un detalle (encerrado en el cuadro de la **Figura 3.1 (b)**) en el cual se evidencia la presencia de partículas no fundidas (unas de gran tamaño y otras pequeñas), las cuales crean una distribución poco homogénea dentro del recubrimiento. Esto puede ser debido a las bajas velocidades de la partícula al utilizar una presión de atomización de 310 KPa, además de no alcanzar la temperatura necesaria para fundir completamente las partículas al utilizar una corriente en el arco eléctrico de 120 Amp.

La **Figura 3.2** corresponde a la MEB de la sección transversal de otro recubrimiento de Babbitt en base de Estaño, depositado mediante la técnica de Arco eléctrico utilizando 120 Amperios y 450 KPa de presión de atomización.

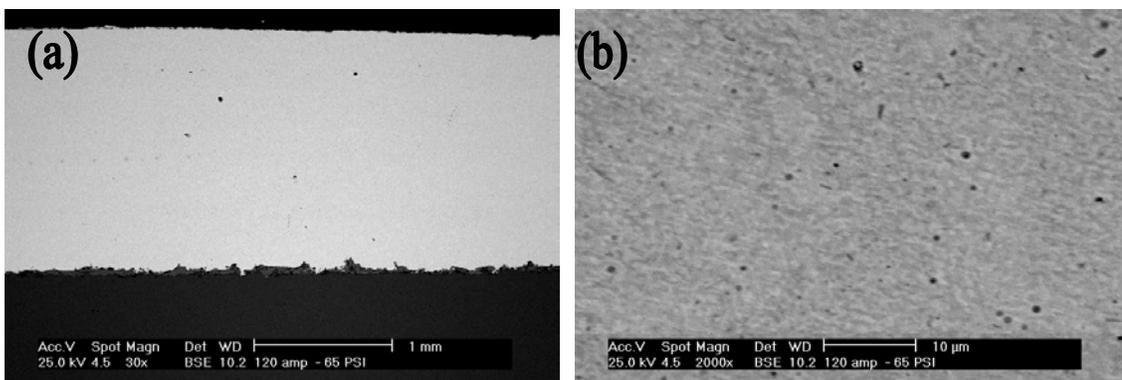


Figura 3.2 (a) MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, rociado con 120Amp-450KPa. 30X, **(b)** MEB de recubrimiento de Babbitt rociado con 120Amp-450KPa, 2000X.

En este proceso el aumento de la presión de atomización genera una mayor velocidad en las partículas con respecto al recubrimiento anterior, lo que produce una mayor compactación de estas dentro del recubrimiento, por tal razón se observa una mejor cohesión de éstas y un recubrimiento más homogéneo, además se puede observar una menor cantidad de poros que el recubrimiento anterior.

La **Figura 3.3** corresponde a la MEB de la sección transversal de otro recubrimiento de Babbitt en base de Estaño, depositado mediante la técnica de Arco eléctrico utilizando esta vez 180 Amperios y 450 KPa de presión de atomización.

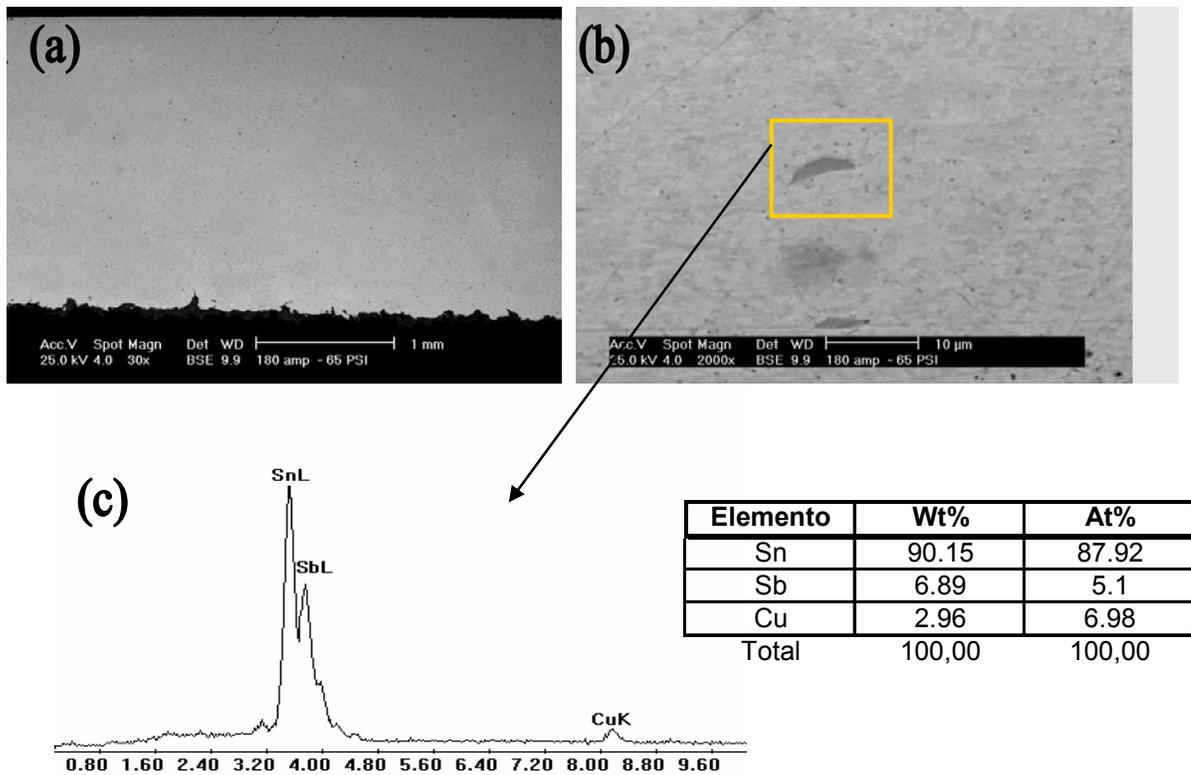


Figura 3.3 (a) MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, 180Amp-450KPa, 30X, (b) MEB de recubrimiento de Babbitt rociado con 180Amp-450KPa, 2000X, (c) Gráfica de análisis químico puntual (EDS).

La **Figura 3.3** (c) muestra un análisis químico puntual (EDS) que se realizó en el detalle encerrado en el cuadro de la **Figura 3.3** (b) y se determinó una composición similar a la nominal.

Cabe destacar que al aumentar el amperaje del arco eléctrico, aumenta la temperatura del proceso, esto ayuda a fundir con mayor facilidad el material y por esto se observa menor cantidad de partículas no fundidas en este recubrimiento. Además se puede observar el bajo contenido de poros y óxidos. En general se observa un recubrimiento bastante homogéneo cuando son utilizados estos parámetros de operación.

La **Figura 3.4** corresponde a la MEB de la sección transversal de otro recubrimiento de Babbitt en base de Estaño, depositado mediante la técnica de Arco eléctrico utilizando 250 Amperios y 310 KPa de presión de atomización.

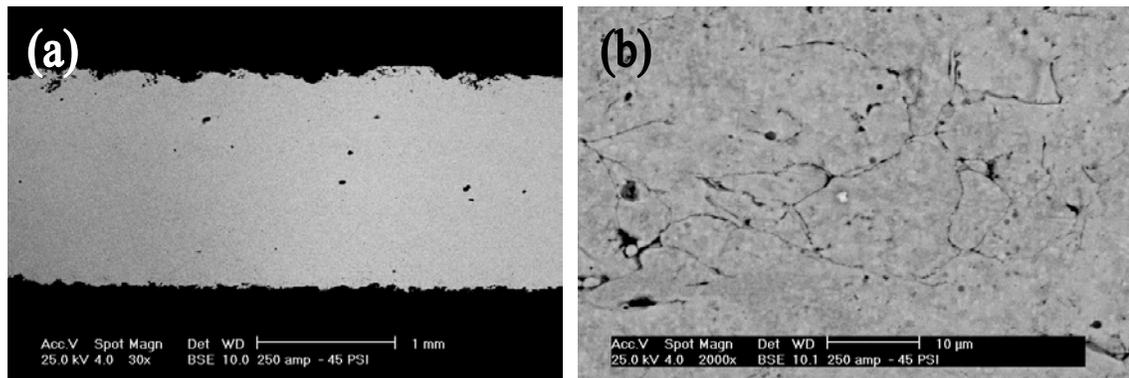


Figura 3.4 (a) MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, rociado con 250Amp-310KPa, 30X, (b) MEB de recubrimiento de Babbitt rociado 250Amp-310KPa, 2000X.

En este recubrimiento se puede observar pocas partículas no fundidas (ver **Figura 3.4 (b)**), ya que al aumentar la corriente del arco eléctrico a 250 Amp se incrementa la temperatura en éste, ayudando a fundir con mayor rapidez el material. Pero a la vez se puede evidenciar la presencia de grietas, esto puede ser debido a la baja presión de atomización de las partículas (310 KPa), la cual no genera la velocidad necesaria para que las partículas se ordenen correctamente dentro del recubrimiento, propiciando la formación de estas grietas y la poca cohesión entre las partículas.

La **Figura 3.5** corresponde a la MEB de la sección transversal de otro recubrimiento de Babbitt en base de Estaño, depositado mediante la técnica de Arco eléctrico utilizando 250 Amperios y 450 KPa de presión de atomización.

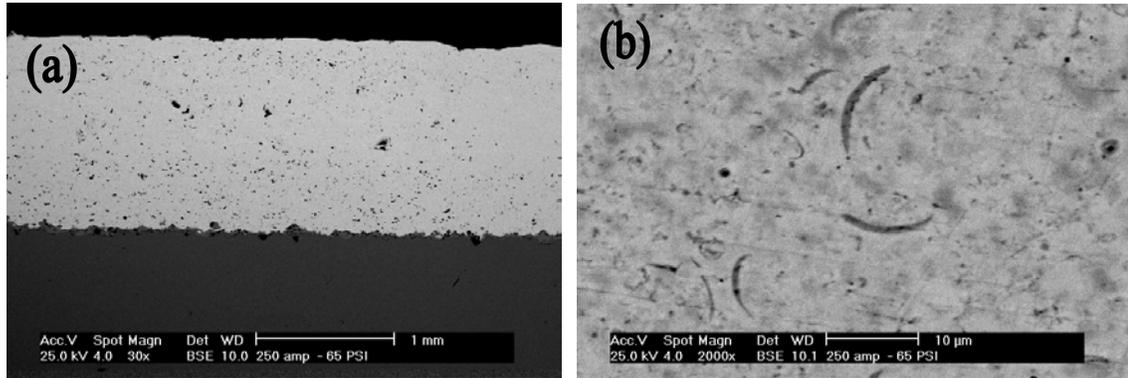


Figura 3.5 (a) MEB de la sección transversal de un recubrimiento de Babbitt, rociado con 250Amp-450KPa, 30X, (b) MEB de recubrimiento de Babbitt rociado con 250Amp-450KPa, 2000X.

Como se puede observar en la **Figuras 3.5 (a) y (b)**, este recubrimiento presenta una alta porosidad, y una microestructura poco homogénea. Esto pudo deberse a que la alta temperatura funde demasiado el material, y al combinar esto con una alta presión de atomización, no permite que las partículas se ordenen correctamente dentro del recubrimiento, provocando así la formación de poros. Posiblemente se aumentaron en exceso los parámetros de operación, lo cual no es recomendado para realizar los recubrimientos depositados por arco eléctrico.

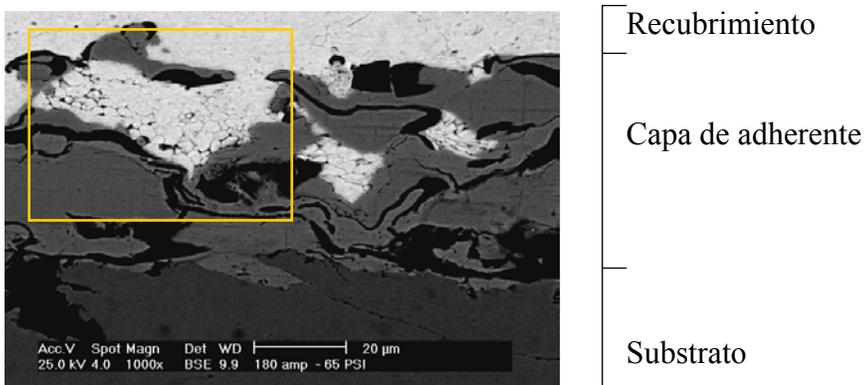


Figura 3.6 Interfase de los recubrimientos 1000X.

En la **Figura 3.6** se observa la zona intermedia ubicada entre el recubrimiento y el sustrato (interfase). La cual es una base de Cobre-Aluminio y fue depositada por arco eléctrico.

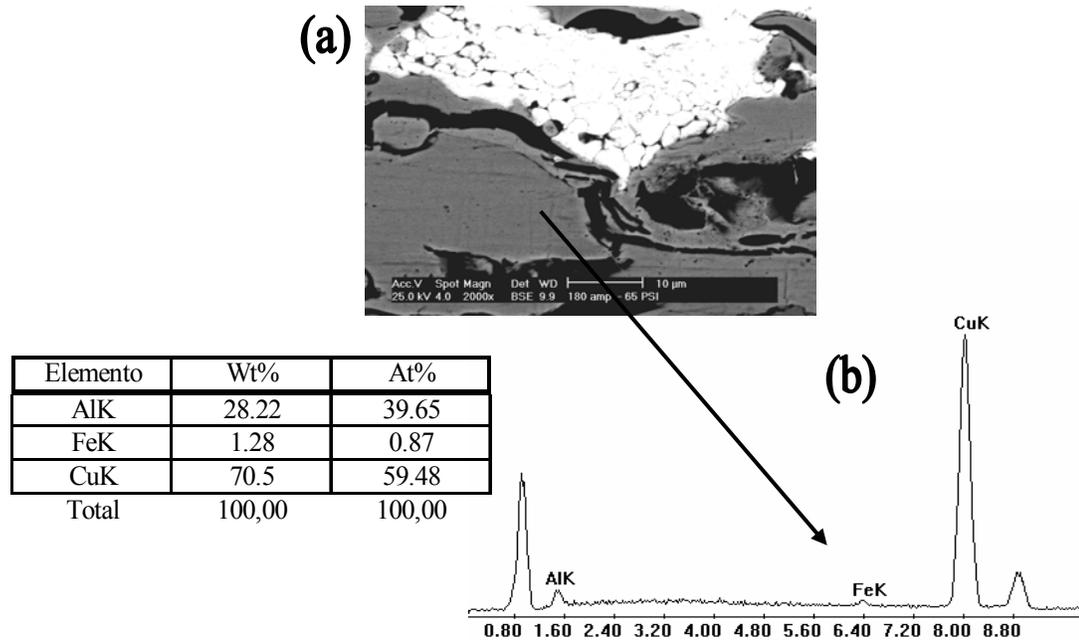


Figura 3.7 (a) Detalle. Partículas de material, (b) Gráfica de análisis químico puntual (EDS) en interface, Cu-Al de recubrimientos.

En la **Figura 3.7 (a)** se observa un detalle (encerrado en un cuadro en la **Figura 3.6**), en el cual se aprecian las partículas del material de Babbitt en contacto íntimo con la capa de adherente, recubrimiento que fue depositado con 180 Amp-450 KPa.

Esta capa de adherencia fue común en todos los procesos estudiados, en las **Figuras 3.6 y 3.7(a)** se puede observar el anclaje mecánico que se forma entre el recubrimiento y el sustrato. Esta capa de adherencia fue depositada con la finalidad de servir como capa de enlace entre el recubrimiento y el sustrato, además de otorgar una resistencia a la corrosión y oxidación del recubrimiento. En cuanto a su topografía se puede decir que es limpia y homogénea, con bajo porcentaje de porosidad, en la **Figura 3.7 (b)** se observa una gráfica con el análisis químico en la zona de la interfase.

3.2.- Porosidad.

Se realizó en el analizador de imágenes, el estudio de porcentaje de porosidad en los recubrimientos estudiados por microscopia electrónica de barrido, tomando las fases más oscuras. Los resultados pueden observarse en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.1 Porcentaje de Porosidad de las muestras analizadas por MEB.

Procesos	120Amp-310KPa	120Amp-450KPa	180Amp-450KPa	250Amp-310KPa	250Amp-450KPa
%Porosidad	14,35	2,56	1,78	8,28	12,66

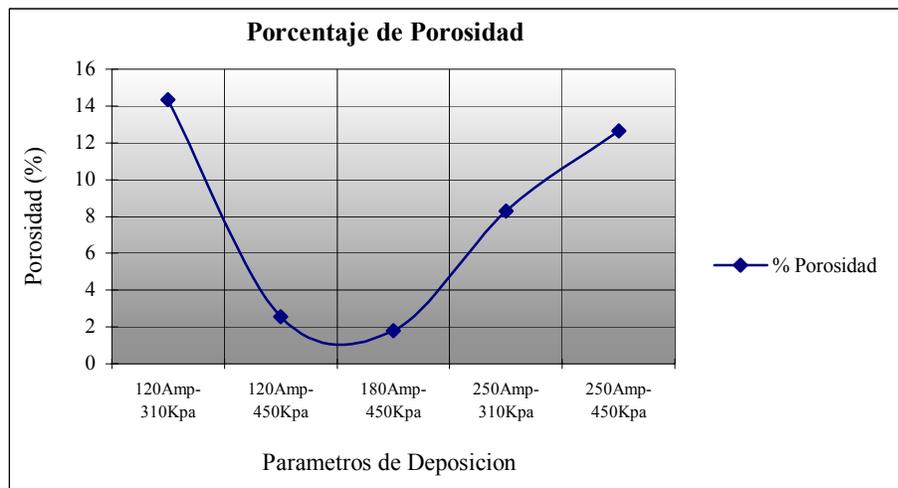


Figura 3.8 Gráfica del porcentaje de Porosidad de las muestras analizadas.

En la **Figura 3.8** se observa que el menor porcentaje de porosidad (1,78 %) se obtuvo para el proceso en el cual se utilizó 180 Amp-450 KPa como parámetros de operación, lo cual indica que existe una mejor cohesión de las partículas cuando se utilizan estos parámetros. No así cuando se utilizó 120 Amp-310 KPa, ya que éstos obtuvieron 14,35% de porosidad, lo cual es 8,06 veces mayor que la obtenida en el recubrimiento antes mencionado, esto pudo haberse debido a una baja energía de impacto, ocasionada principalmente por una baja velocidad de las partículas en el rociado (partículas no fundidas).

3.3.- Microdureza Vickers.

Los resultados obtenidos en el ensayo de microdureza pueden ser observados en la la **Figura 3.9**, (ver **Tabla 6.10** en anexos).

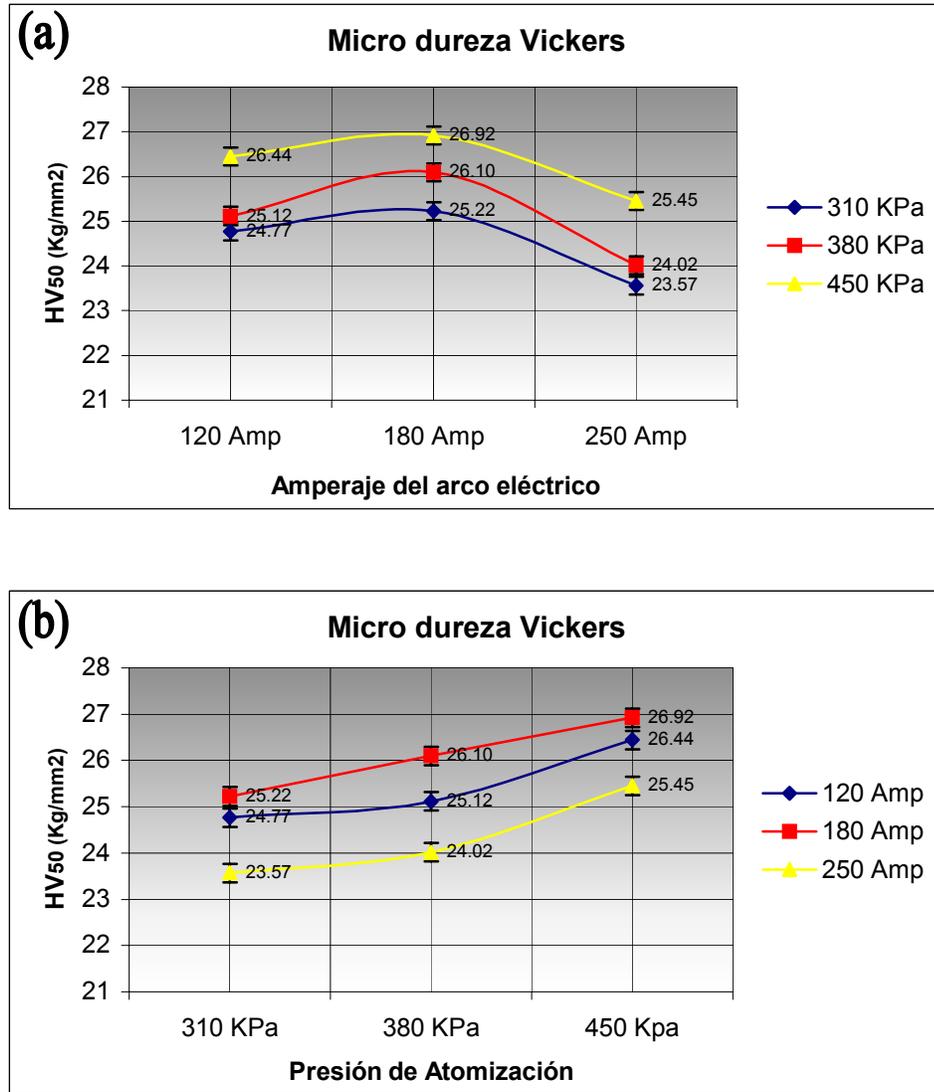


Figura 3.9 (a) Dureza de Recubrimientos de Babbitt vs. Amperaje del arco eléctrico, para las diferentes presiones de atomización, **(b)** Dureza de Recubrimientos de Babbitt vs. Presión de atomización, para los diferentes amperajes del arco eléctrico.

De la **Figura 3.9(a)** se desprende que la mayor dureza se obtuvo para el proceso de arco eléctrico con parámetros de operación de 120-180 Amp combinados con 450 KPa, debido seguramente esta alta presión de atomización, lo cual crea un rociado de partículas (Splats) más pequeñas a mayor velocidad y permite una distribución homogénea y uniforme de éstas dentro del recubrimiento, como lo demostró X. Wang en su estudio (Wang X., et al., 1996). Así como también puede ser observado que el recubrimiento depositado utilizando los parámetros de 250 Amp-310 KPa, tiene hasta 1,14 veces menor valor de dureza que los recubrimientos antes mencionados, esto puede ser debido a alta porosidad la cual alcanza un 8,28%, hasta 4,65 veces mayor que estos recubrimientos. Esto indica los recubrimientos tienen una menor compactación cuando son rociados bajo 250 Amp y 310 KPa como parámetros de operación.

En general, en la **Figura 3.9(a)** se puede observar, que la tendencia hacia mayores valores de dureza (en promedio), se obtuvo para los recubrimientos en los cuales se utilizó una corriente para el arco eléctrico de 180 Amperios, valores intermedios fueron encontrados en las muestras depositadas con una corriente de 120 Amperios y por último la menor dureza se encontró cuando una corriente del arco eléctrico de 250 Amperios fue utilizada.

De la **Figura 3.9(b)** se puede observar la tendencia hacia mayores valores de dureza, para los recubrimientos donde se utilizó una presión de atomización de 450 KPa, seguido donde se utilizó 380 KPa y por último una menor dureza donde se utilizó 310KPa como parámetro de operación para depositar los recubrimientos.

La Figura 3.9(b) muestra como los grupos de recubrimientos depositados con una presión de atomización baja (310KPa), presentan menores valores de dureza, esto puede ser debido a que la velocidad de las partículas (Splats) no es suficiente para lograr la compactación necesaria entre ellas, produciendo un aumento del porcentaje de porosidad dentro del recubrimiento (Wang X., et. al., 1996). A su vez la excesiva o

muy baja temperatura producida por la corriente del arco eléctrico, afecta los valores de dureza ya que juega un papel importante en el ordenamiento de las fases dentro del recubrimiento (D.J. Varacalle et. al., 1997).

3.4.- Desgaste Abrasivo.

Los resultados obtenidos en el ensayo de desgaste abrasivo pueden ser observados en la **Figura 3.10** (ver **Tabla 6.6** en anexos).

Los detalles del cálculo de las pérdidas de volumen pueden encontrarse en los anexos (ver **Cálculos tipo** realizados).

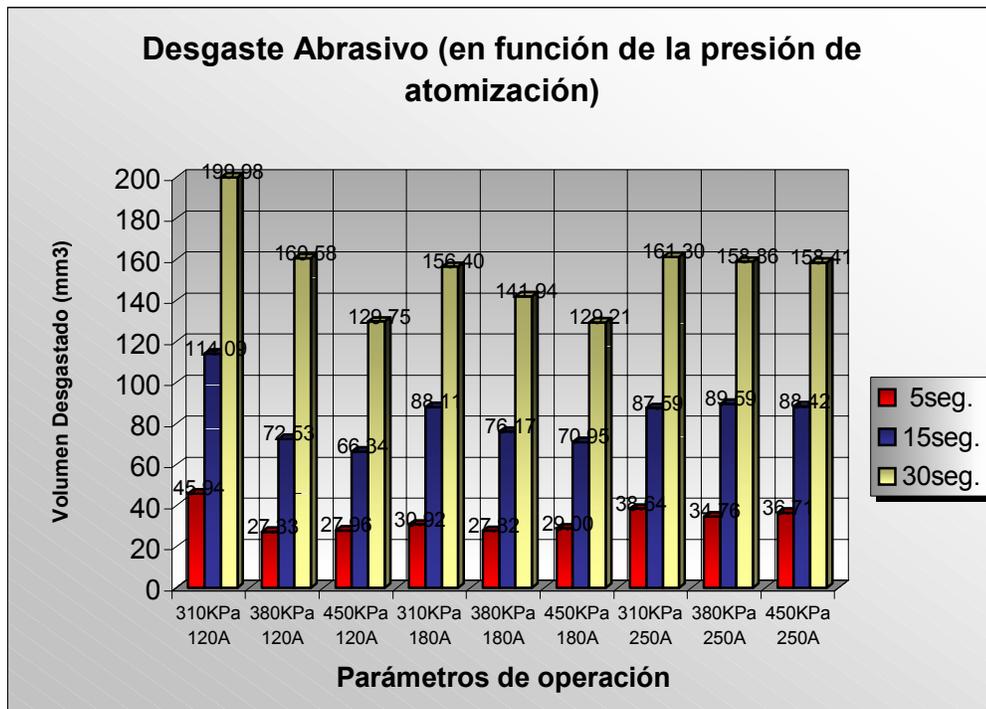
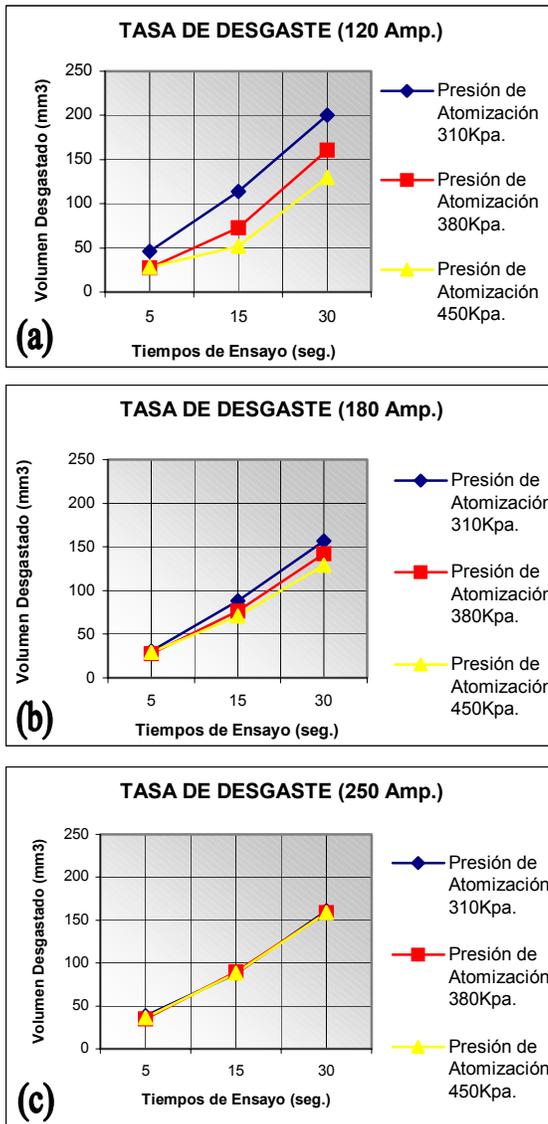


Figura 3.10 Volumen desgastado en el ensayo vs. los diferentes parámetros de proceso de rociado por Arco Eléctrico utilizados para depositar los recubrimientos.

A fin de visualizar los resultados del ensayo de desgaste abrasivo, la **Figura 3.10** muestra la influencia de los parámetros de operación del proceso de rociado térmico por arco eléctrico sobre el volumen desgastado de los recubrimientos para cada uno de los tiempos estudiados. En esta figura se evidencia que el mayor volumen desgastado se obtuvo para el proceso de arco eléctrico con parámetros de operación de 120 Amperios-310KPa (199,98mm³). También se puede observar que los procesos con parámetros de operación 180 Amperios-450KPa y 120 Amperios-450KPa, resultaron con menor cantidad de volumen desgastado (129,2-129,7 mm³),

hasta 1,55 veces menores que el recubrimiento antes mencionado. Por otra parte, si observamos los recubrimientos realizados con baja presión de atomización y muy bajo o alto amperaje, poseen una microestructura menos uniforme y con un alto porcentaje de porosidad (ver **Figuras 3.1, 3.4 y 3.5**) lo cual contribuye a un mayor remoción de las partículas (Splats).

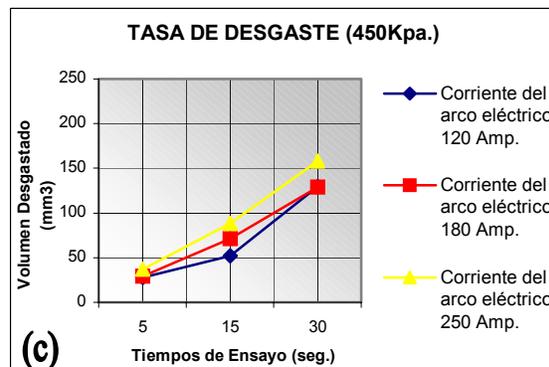
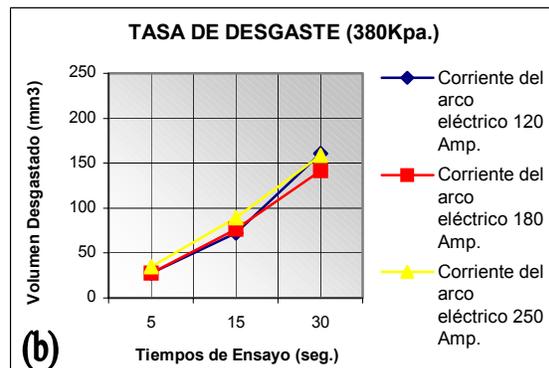
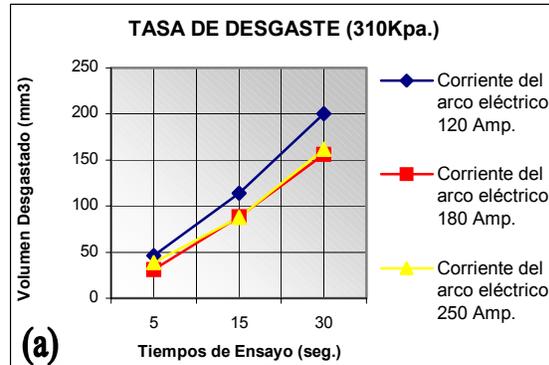


Figuras 3.11(a), (b) y (c) Volumen desgastado vs Tiempo de ensayo de desgaste abrasivo.

En las **Figuras 3.11(a), (b) y (c)**, se puede observar la tasa de volumen desgastado con respecto al tiempo de ensayo para cada uno de los parámetros de operación del proceso, donde se evidencia que las peores condiciones para llevar a cabo el proceso se obtienen utilizando bajas presiones de atomización. Nótese que a medida que el amperaje del arco eléctrico aumenta, la influencia de la variación de presión de atomización sobre la tasa de desgaste disminuye, es decir, la tasa de volumen desgastado es más sensible a la variación de la presión de atomización para amperajes del arco eléctrico bajos.

En las Figuras 3.12(a), (b) y (c), se puede observar como la tasa de volumen desgastado disminuye a medida que aumenta la presión de atomización del proceso, además de evidenciarse el comportamiento similar para todas las condiciones de rociado de aumentar la rata de desgaste(mm³/seg.) a medida que el tiempo de ensayo transcurre.

La influencia de la presión de atomización sobre los recubrimientos realizados con una corriente del arco eléctrico de 120 Amperios es evidente. Esto se debe posiblemente a la dependencia de la compactación de las partículas (Splats) necesaria para obtener una microestructura homogénea, ya que con esta corriente (120 amp) posiblemente no se alcanza la temperatura ideal para fundir completamente el material de deposición, para así proporcionarle un ordenamiento apropiado a estas partículas dentro del recubrimiento, como lo demostró X. Wang en su estudio (Wang X., et al, 1996).



F
Figuras 3.12 (a), (b) y (c) Volumen desgastado vs Tiempo de ensayo de desgaste abrasivo.

En la **Figura 3.13(a)** se puede observar que la tendencia hacia menores cantidades de volumen desgastado en el ensayo normalizado (30 seg.), corresponde a los recubrimientos donde se utilizó 180 Amperios en la corriente del arco eléctrico. Esto posiblemente puede ser debido a que el material alcanza la temperatura apropiada para fundirse y propicia una distribución homogénea de las partículas dentro del recubrimiento, como lo demostró Wang en su estudio (Wang B., 1995).

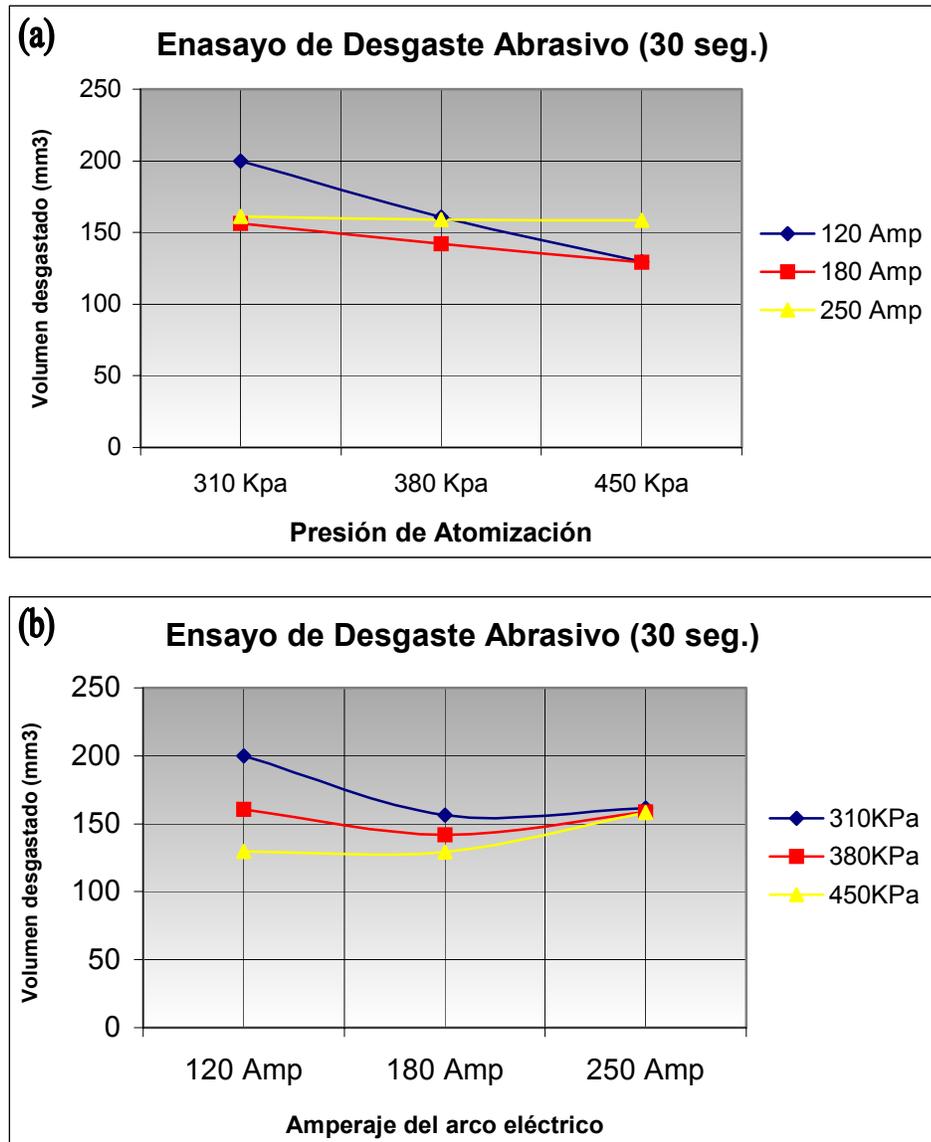


Figura 3.13 (a) Volumen desgastado vs. parámetros de deposición, ensayo normalizado (30 seg.), en función de la presión de atomización, (b) Volumen desgastado vs. parámetros de deposición, en ensayo normalizado (30 seg.), en función del amperaje del arco eléctrico.

En la **Figura 3.13(a)** se evidencia al igual que en las **Figuras 3.11** y **3.12**, que a medida que se incrementa el amperaje del arco eléctrico disminuye la influencia de la variación de la presión de atomización sobre el volumen desgastado.

En la **Figura 3.13(b)** se puede observar, la tendencia a disminuir la cantidad de volumen desgastado en el ensayo de desgaste abrasivo normalizado (30 seg.) a medida que se incrementa la presión de atomización en el proceso de Rociado térmico.

En las **Figuras 3.13** se observa que la pérdida volumétrica de estos recubrimientos de Babbitt, es considerablemente alta para un ensayo de desgaste en el cual se utiliza un tiempo de prueba de 30 seg. (En comparación con otros materiales ensayados en estudios anteriores, los cuales presentan una menor cantidad de volumen desprendido). Esto puede ser debido a la baja dureza del Babbitt, la cual se encuentra entre 23 y 27 HV₅₀ y facilita que partículas más duras como las del material abrasivo puedan penetrar en el recubrimiento y desprender aún más material que en materiales con una mayor dureza. De acuerdo con la ecuación de Archard (ASM Handbook, 1994), se evidencia que el desgaste abrasivo disminuye directamente con el aumento de la dureza del material, además de la carga aplicada y la forma del abrasivo. En otros estudios se ha demostrado tanto teórica como prácticamente que la dureza del material se correlaciona con su velocidad de abrasión, según Khrushchov (ASM Handbook, 1994) existe una relación inversa entre la velocidad de abrasión y la dureza de materiales puros recocidos, también ensayó aceros de dureza variable, obteniendo una relación linealmente inversa al desgaste abrasivo.

En la **Figura 3.14**, se muestra un gráfico que representa la relación existente entre el volumen desgastado en el ensayo normalizado (Procedimiento C) y la Microdureza HV₅₀ obtenida para cada corrida del recubrimiento.

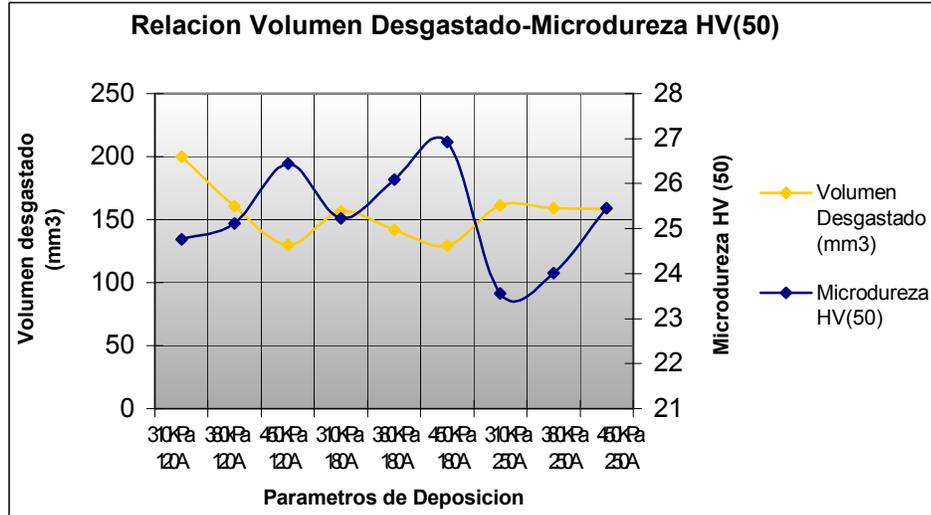


Figura 3.14 Relación entre el Volumen desgastado y la Microdureza HV₅₀.

En esta gráfica se puede observar como la pérdida de volumen por abrasión de dichos recubrimientos está relacionada con la dureza del material, ya que para los valores de Microdureza Vickers mas altos se encuentran los valores más bajos de pérdidas volumétricas en el ensayo de desgaste abrasivo. Así como lo encontrado en estudios realizados por García E., et al., 1998; en el cual obtiene que el desgaste en los recubrimientos es inversamente proporcional a la dureza de los mismos.

Se observa que la diferencia entre los valores de dureza para las 9 condiciones depositadas es baja (23-27 HV₅₀ aprox.), Por lo que se podría que la microestructura de los recubrimientos jugó un papel muy importante en la obtención de estos valores.

En la **Figura 3.15**, se muestra un gráfico que representa la relación existente entre el volumen desgastado en el ensayo normalizado (Procedimiento C) y el porcentaje de porosidad existente en las muestras que fueron observadas mediante MEB y estudiadas con el analizador de imágenes.

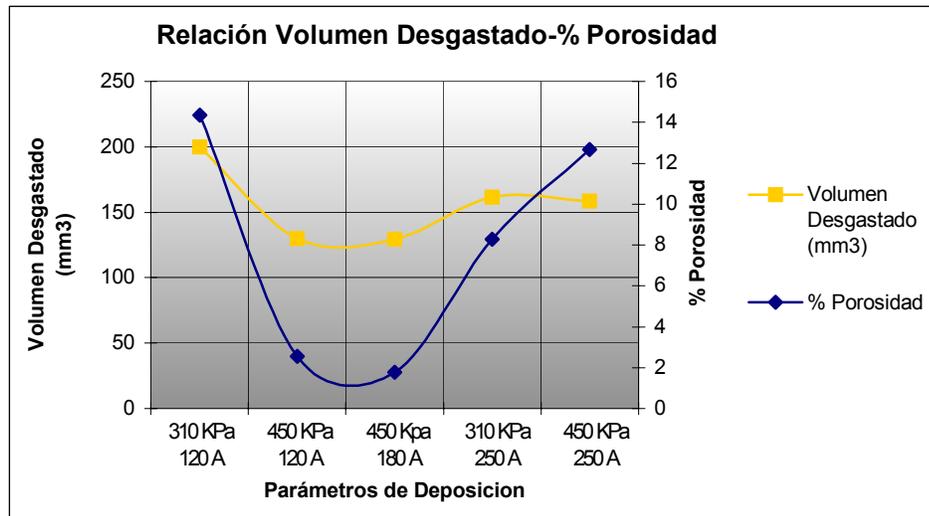


Figura 3.15 Relación entre el Volumen desgastado y el porcentaje de Porosidad.

Según estudios realizados por algunos investigadores (Wang B., 1995), demuestran que los recubrimientos con Splats de gran tamaño, alta porosidad y microestructura heterogénea son menos resistentes al desgaste. De igual manera en este estudio se obtuvo que el porcentaje de porosidad guarda una relación con el volumen desgastado.

En la **Figura 3.15** se puede observar que para menores porcentajes de porosidad, el desgaste abrasivo resulta menor. Este hecho se evidencia al observar la microestructura del recubrimiento depositado con 120 amperios y 310 Ppa como parámetros del proceso (ver **Figura 3.1**), en éste se puede apreciar una microestructura un poco heterogénea (con respecto a los otros recubrimientos estudiados), con poros y grietas, obteniéndose para éste el mayor volumen de desgaste por abrasión. Investigadores como García y Redden (García E., et al., 1998)

encontraron una relación similar para recubrimientos realizados de una aleación de base Níquel depositados con la técnica de HVOF.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El material de Babbitt depositado con los parámetros de arco eléctrico de 120 y 180 Amperios combinados con 450 KPa (65 Psi) de presión de atomización, estudiados en este trabajo, presentaron hasta 1,55 veces mayor resistencia al desgaste abrasivo que el resto de los recubrimientos, lo cual puede ser atribuido a una mejor homogeneidad en su microestructura.

El mayor volumen desgastado correspondió a los recubrimientos en los cuales se utilizó 120 y 250 Amperios en la corriente del arco eléctrico, combinadas con 310 KPa (45 Psi) como presión de atomización. Esto se debe posiblemente a que las partículas no alcanzan la temperatura apropiada para fundirse, así como tampoco la velocidad necesaria para propiciar una distribución homogénea de las fases.

La dureza del recubrimiento alcanza su mayor valor cuando es depositado utilizando 120 y 180 Amperios y 450 KP (65 Psi) hasta 1,14 veces mayor dureza que aquellos recubrimientos depositados con los otros parámetros, esto pudo ser debido a una menor porosidad y mejor cohesión entre las partículas del recubrimiento.

Los resultados revelan que el menor porcentaje de porosidad lo obtuvieron los recubrimientos depositados con 120 y 180 Amperios combinados con una presión de atomización de 450 KPa (65 Psi), hasta 4,65 veces menor porosidad que el resto de los parámetros utilizados, reflejándose esto en un menor volumen desgastado en el ensayo de abrasión.

Los resultados revelan que a medida que se incrementa el amperaje del arco eléctrico, disminuye la influencia de la variación de la presión de atomización sobre el volumen desgastado. Lo cual puede ser atribuido a que a bajos amperajes no se alcanza la temperatura necesaria para fundir completamente las partículas por lo cual,

incrementar progresivamente la presión de atomización, influye en gran medida para obtener una distribución homogénea en el recubrimiento.

RECOMENDACIONES

Utilizar entre 120 y 180 Amperios (o el que por razones de costo resulte más favorable) en la corriente del arco eléctrico combinados con una presión de atomización de 450KPa (65 Psi), para obtener recubrimientos más homogéneos y resistentes al desgaste.

Automatizar todo el proceso de Rociado térmico, con la finalidad de incrementar la precisión y equidad en todos los recubrimientos a efectuar, ya que se tendría un control absoluto de los parámetros del proceso.

Realizar los recubrimientos teniendo cuidado de que todos obtengan el mismo espesor, a la vez de que estos sean suficientemente gruesos para realizar el estudio y ensayos convenientemente, teniendo en cuenta que estos espesores disminuyen al ser rectificadas.

Utilizar mascarillas o tapa-polvos al manipular la arena abrasiva ya que inhalar estos polvos resulta nocivo para la salud.

Evitar la oxidación de las muestras luego de la preparación metalográfica y tratar en lo posible de realizar el estudio por microscopia electrónica de barrido inmediatamente después de esta preparación.

Realizar estudios de microscopia electrónica de barrido a las probetas luego del ensayo de desgaste abrasivo, para observar la morfología del material y observar claramente que tipo de desgaste ocurrió en la superficie.

Realizar el ensayo de Microdureza en un equipo mas sofisticado al utilizado que sea capaz de realizar un mayor número de improntas de manera rápida y automatizada.

CAPÍTULO V

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASM HANDBOOK, 1.994 “Mechanical Testing”. Copyright by ASM, USA. Vol. A1. Pág. 1.298.

- Baghdachi, Jamil A. 1.997 “Fundamental of Adhesion”. Vol. 69, No.870, pp. 84-93.

- D. J. Varacalle, Jr., et al., 1.998 “Experimental Studies of Twin-Wire Electric Arc Sprayed Zinc/Aluminum Alloy Coatings”. En: Journal of Thermal Spray Technology, ASM International. Vol. 7. Pág. 513.

- García, E., Redden, E. 1.998 “Influencia de desgaste Erosivo Sobre una Aleación de Base NiCr Depositada por el proceso de HVOF”. Tesis, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Pág. 101.

- Herbert Herman, et al., 1.993 “Thermal Spray Coatings”. ASM Handbook, 6ta Edición. Brazing and Soldering. Special Welding and joining topics. Vol. 6.

- Hower Jr., C. P., 1.994 “Thermal Spraying: Processes, Preparation, Coatings and Applications”. En: Welding Journal. Vol. 78.

- Howes, 1.994 “Thermal Spraying: Processes, Preparation, Coatings and Applications”. En: Welding Journal. Vol. 78.

- Larsen, J., Basse, 1.975 “Influence of Atmospheric Humidity on Abrasive Wear”. Vol. 32. Pág. 200.

-
- Mercer, A. D., y Hutchings, I. M. 1.985 “The Influence of Atmospheric Humidity on the Abrasive Wear of Metals”. ASME. Pág. 1.130.
- Pinto, M., Rangel, C. 1.999 “Diseño, Construcción y Puesta a Punto de una Maquina para Ensayo de Abrasión Según la Norma ASTM G 65”. Tesis, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Pág. 4-53.
- Rabinowicz, E. 1.965 “Friction and wear of Materials”. John Wiley and Sons, New York. E.E.U.U. Pág. 206.
- Sedriks A. J., Mulhearn, T. O., 1.984 “The Effect of Work-Hardening on the Mechanics of Cutting in Simulated Abrasive Processes, Wear. Vol. 7. Pág 451.
- Smith, W., et al. 1.991 “The Future of Thermal Spray Technology”. En: Welding Journal. Vol. 47.
- Steijn, R. P., 1.984 “Friction and wear of Single Crystals”. Vol. 7. Pág. 300.
- Wang, B. Q. 1995 “The Elevated Temperature Erosion Behavior of HVOF Tungsten Carbide Cement Coating”. En: Proceeding of the Fourth National Spray Conference, Houston, Texas.
- Wang, X., et al., 1.996 “Effect of Gas Velocity and Particle Velocity on Coating Adhesion in Wire Arc Spraying”. En: Thermal Spray. ASM International, Materials Park, Ohio, USA.

CAPÍTULO VI

ANEXOS

CÁLCULO DE LAS DENSIDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS

Corrida 1: Recubrimiento de Babbitt con 120 Amperios-45Psi como parámetros de operación del Rociado térmico por Arco Eléctrico.

$$P_{\text{seco}} = 4,5001 \text{ gr.}$$

$$V_{\text{desplazado}} = V_{\text{muestra}} = 1,00 \text{ ml.}$$

Densidad del Recubrimiento (ρ)

$$\rho_{\text{recubrimiento}} = P_{\text{seco}} / V_{\text{muestra}}$$

$$\rho_{\text{recubrimiento}} = 4,5001 \text{ gr.} / 1,00 \text{ ml.}$$

$$\rho_{\text{recubrimiento}} = 4,5001 \text{ gr./ml.}$$

CÁLCULO DE VOLUMEN DESPRENDIDO

Corrida 1: Recubrimiento de Babbitt con 120 Amperios-45Psi como parámetros de operación del Rociado térmico por Arco Eléctrico.

Diferencias de Pesos

$$\text{Pérdida de masa} = \text{Masa inicial (gr.)} - \text{Masa final (gr)}$$

$$\text{Pérdida de masa}_{C1} = 85,1522 - 84,9492$$

$$\text{Pérdida de masa}_{C1} = 0,203$$

Pérdida Volumétrica

$$\text{Pérdida Volumétrica} = \frac{\text{Pérdida de masa (gr.)}}{\text{Densidad (gr/ml)}} \times 1000$$

$$\text{Pérdida Volumétrica}_{C1} = \frac{0,203 \text{ gr.}}{4,5001 \text{ gr./ml}} \times 1000$$

$$\text{Pérdida Volumétrica}_{C1} = 45,1101 \text{ mm}^3$$

Ajuste de Perdida volumétrica

$$\text{PVA} = \text{Volumen Perdido (mm}^3) * \frac{\text{Diámetro inicial de la rueda (228,6 mm. (9,00 pulg.))}}{\text{Diámetro de la rueda después de usada (mm.)}}$$

$$\text{Ajuste de Pérdida volumétrica}_{C1} = 45,1101 \times \frac{228,6}{225,0}$$

$$\text{Ajuste de Pérdida volumétrica}_{C1} = 45,8319 \text{ mm}^3.$$

CÁLCULO DE LA MICRODUREZA VICKERS HV 50 GR.

Corrida 1, 1era impronta/8: Recubrimiento de Babbitt con 120 Amperios-45Psi como parámetros de operación del Rociado térmico por Arco Eléctrico.

Diagonales

$$E_1 = 60 \times 10^{-3} \text{ mm.}$$

$$E_2 = 60 \times 10^{-3} \text{ mm.}$$

Promedio de diagonales

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

$$E = \frac{(60 + 60) \times 10^{-3} \text{ mm.}}{2}$$

$$E = 0,06 \text{ mm.}$$

Carga aplicada

$$P = 50 \text{ gr.} = 0,05 \text{ Kg.}$$

Microdureza Vickers HV_{50gr.}

$$HV = \frac{P \times 1,854}{E^2}$$

$$HV_{50gr.} = \frac{0,05 \text{ Kg.} \times 1,854}{(0,06 \text{ mm.})^2}$$

$$HV_{50gr.} = 25,75 \text{ Kg./mm}^2.$$

Tabla 6.1 Masas de las probetas antes del ensayo de desgaste abrasivo (gr.).

N°	PARAMETROS DE DEPOSICIÓN									Tiempo
Muestras	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	(Seg.)
1	85.1522	88.2095	93.8132	94.3757	77.9588	92.9514	78.2764	82.815	84.7571	5
2	86.5143	88.3807	94.0742	96.8708	78.6119	93.0717	80.4917	83.0122	83.6531	5
3	87.1293	88.5187	94.1008	97.4596	82.0204	93.5354	81.7261	83.0739	84.3947	5
4	87.3731	89.1488	94.1238	97.6669	84.0503	93.5519	83.0582	83.6386	85.3455	15
5	87.4788	89.727	94.2113	98.2391	85.6073	93.606	83.1232	84.0063	85.6538	15
6	87.5721	89.9441	94.4126	98.5105	88.4555	93.8971	89.209	84.5489	85.8572	15
7	87.673	90.1478	94.8557	98.9578	90.3189	94.0572	88.6933	84.6671	86.021	30
8	87.8557	90.6437	94.9654	99.1369	91.3801	94.225	89.0629	86.5251	86.0904	30
9	87.9572	91.2604	95.3376	100.5962	92.5756	96.7209	91.1928	86.7118	86.2252	30

Tabla 6.2 Masas de las probetas después del ensayo de desgaste abrasivo (gr.).

N°	PARAMETROS DE DEPOSICIÓN									Tiempo
Muestras	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	(Seg.)
1	84.9492	88.0285	93.6212	94.1998	77.781	92.7664	78.0744	82.6282	84.5532	5
2	86.2856	88.1942	93.8863	96.7011	78.4353	92.8935	80.2903	82.8325	83.446	5
3	86.9505	88.3421	93.9038	97.2785	81.8427	93.3399	81.5225	82.8813	84.1948	5
4	86.8673	88.6671	93.9918	97.1662	83.5613	93.0967	82.5999	83.1579	84.8547	15
5	86.978	89.2483	93.7406	97.7786	85.1276	93.1467	82.6455	83.5181	85.1728	15
6	87.0627	89.4603	93.9465	97.9706	87.9671	93.4449	88.769	84.0768	85.3577	15
7	86.7871	89.0819	93.9562	98.0693	89.4099	93.228	87.8484	83.8016	85.139	30
8	86.9577	89.4012	94.0602	98.1829	90.462	93.3808	88.2013	85.6561	85.1919	30
9	87.0838	90.3716	94.4652	99.7743	91.6876	95.9054	90.3654	85.891	85.3697	30

Tabla 6.3 Diferencias de masas (gr.) (antes-después del ensayo de desgaste).

N°	PARAMETROS DE DEPOSICIÓN									Tiempo
Muestras	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	(Seg.)
1	0.2030	0.1810	0.1920	0.1759	0.1778	0.1850	0.2020	0.1868	0.2039	5
2	0.2287	0.1865	0.1879	0.1697	0.1766	0.1782	0.2014	0.1797	0.2071	5
3	0.1788	0.1766	0.1970	0.1811	0.1777	0.1955	0.2036	0.1926	0.1999	5
4	0.5058	0.4817	0.1320	0.5007	0.4890	0.4552	0.4583	0.4807	0.4908	15
5	0.5008	0.4787	0.4707	0.4605	0.4797	0.4593	0.4777	0.4882	0.4810	15
6	0.5094	0.4838	0.4661	0.5399	0.4884	0.4522	0.4400	0.4721	0.4995	15
7	0.8859	1.0659	0.8995	0.8885	0.9090	0.8292	0.8449	0.8655	0.8820	30
8	0.8980	1.2425	0.9052	0.9540	0.9181	0.8442	0.8616	0.8690	0.8985	30
9	0.8734	0.8888	0.8724	0.8219	0.8880	0.8155	0.8274	0.8208	0.8555	30

Tabla 6.4 Pérdidas Volumétricas (mm³).

N°	PARAMETROS DE DEPOSICIÓN									Tiempo
Muestras	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	(Seg.)
1	45.11	26.84	27.48	30.49	27.45	28.36	37.97	34.29	36.18	5
2	50.82	27.66	26.89	29.41	27.26	27.32	37.86	32.99	36.75	5
3	39.73	26.19	28.19	31.39	27.43	29.97	38.27	35.36	35.47	5
4	112.40	71.44	18.89	86.78	75.48	69.78	86.14	88.24	87.09	15
5	111.29	70.99	67.36	79.81	74.05	70.40	89.79	89.62	85.35	15
6	113.20	71.75	66.70	93.58	75.39	69.32	82.70	86.66	88.64	15
7	196.86	158.07	128.73	154.00	140.32	127.10	158.81	158.88	156.51	30
8	199.55	184.26	129.54	165.35	141.72	129.40	161.95	159.52	159.44	30
9	194.08	131.81	124.85	142.45	137.08	125.00	155.52	150.68	151.81	30

Tabla 6.5 Ajustes por Pérdidas Volumétricas (mm³).

N°	PARAMETROS DE DEPOSICIÓN									Tiempo
Muestras	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	(Seg.)
1.00	45.83	27.27	27.92	30.98	27.89	28.81	38.58	34.84	36.76	5.00
2.00	51.63	28.10	27.32	29.88	27.70	27.75	38.46	33.52	37.34	5.00
3.00	40.37	26.61	28.64	31.89	27.87	30.45	38.88	35.92	36.04	5.00
4.00	114.20	72.58	61.82	88.17	76.69	70.89	87.52	89.66	88.48	15.00
5.00	113.07	72.13	68.44	81.09	75.23	71.53	91.23	91.05	86.72	15.00
6.00	115.01	72.89	67.77	95.07	76.60	70.42	84.03	88.05	90.05	15.00
7.00	200.01	160.60	130.79	156.46	142.56	129.14	161.35	161.42	159.01	30.00
8.00	202.74	187.21	131.61	167.99	143.99	131.47	164.54	162.08	161.99	30.00
9.00	197.19	133.92	126.85	144.73	139.27	127.00	158.01	153.09	154.24	30.00

Tabla 6.6 Promedio de ajustes por pérdidas volumétricas (mm³).

Prom.	Parámetros de Deposición									tiempo
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	(seg.)
1	45.94	27.33	27.96	30.92	27.82	29.00	38.64	34.76	36.71	5
2	114.09	72.53	66.34	88.11	76.17	70.95	87.59	89.59	88.42	15
3	199.98	160.58	129.75	156.40	141.94	129.21	161.30	158.86	158.41	30

Tabla 6.7 Desviación Estándar de los promedio de ajustes por pérdidas volumétricas (mm³).

Desviación	Parámetros de Deposición									tiempo
Estándar	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	(seg.)
1	4.60004	0.61021	0.54104	0.8206	0.08526	1.10828	0.17733	0.98389	0.53102	5
2	0.79617	0.31533	2.97831	5.70826	0.6665	0.45322	2.93966	1.22684	1.36243	15
3	2.26751	2.75652	2.0805	9.49685	1.9768	1.82536	2.66661	4.09263	3.19327	30

Tabla 6.8 Microdureza Vickers HV_{50 gr.}, diagonales de improntas dejadas por el identador (0.001mm.).

No. Improntas	Parámetros de Deposición																	
	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9	
	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1	E2
1	60	60	60.5	60.5	59.5	59	61	60.5	60	58.5	59	59	62.5	63	59	57.5	61	60.5
2	60	60	60.5	60	60	58.5	60.5	60.5	59	59	58	58	62	62.5	59.5	58.5	61	59.5
3	61.5	61.5	60.5	60	58.5	59	60	60.5	60.5	61	60	59	62.5	63	65	63	61.5	60
4	64	63	61	61	59	58.5	61	60	59.5	59.5	59.5	58.5	63.5	62.5	62	63	60	59.5
5	62	60	61.5	61.5	59	60	61.5	61	60	60	59	56.5	63	63.5	64	65	61	59.5
6	61	61.5	61.5	60.5	60	59.5	60.5	60.5	59	59.5	58.5	59	62.5	62	63	65	59.5	61.5
7	62	60.5	60.5	61	58.5	59	60.5	61	60	59.5	59	58.5	63	62	63	61	60	60.5
8	60.5	61	61.5	60	60	59	61	60	59	60	59.5	58	62.5	63.5	62	63.5	61	60

Tabla 6.9 Microdureza Vickers HV_{50 gr.}, Promedio de las diagonales de improntas dejadas por el identador (0.001mm.).

Diagonales	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Prom.	61.1786	60.75	59.2083	60.625	59.6	58.6786	62.7188	62.125	60.35

Tabla 6.10 Microdureza Vickers HV_{50 gr.}

Micro Dureza Vickers (50gr)	Parámetros de Deposición								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	24.7674	25.1181	26.4432	25.2218	26.0968	26.9228	23.5659	24.0186	25.4522

Tabla 6.11 Densidades de los Recubrimientos (gr./ml).

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
4.5001	6.7431	6.9877	5.7696	6.4781	6.5237	5.3201	5.4474	5.6354