

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción (FIMCP)**

“Reparación de un Eje de Motor Eléctrico Mediante un Proceso
de Metalización”

INFORME DE TRABAJO PROFESIONAL

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Omar Gonzalo Moreano Merchán

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2012

AGRADECIMIENTO

A quienes me permitieron
culminar con éxito mi Carrera:
Dios y Mis Padres.

A quienes colaboraron en la
realización de este Trabajo,

Mi Director: Ing. Omar Serrano V.

A los representantes de IMETCA:

Ing. Juan Carlos Araujo y Sr.
Hugo Carrera.

Al Ing. Daniel Carvajal.

DEDICATORIA

A mi Patria, el Ecuador. Porque algún día, y sólo por la acción de un auténtico Gobierno y la colaboración de todos nosotros, se convertirá en el País que soñamos.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gustavo Guerrero M.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Omar Serrano V.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Julián Peña
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Informe de Trabajo Profesional, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Omar Gonzalo Moreano Merchán

RESUMEN

En todo tipo de industria destinada a la obtención, elaboración o conversión de materia prima o producto final, existe un departamento dedicado a realizar tareas de mantenimiento, las cuales pueden ser preventivas o correctivas, a los equipos y partes que constituyen el proceso en la industria.

Una de las tareas de mantenimiento comúnmente realizadas, es el proceso de soldadura. Por medio de este proceso es posible recuperar piezas fisuradas o desgastadas por la acción del trabajo que realiza. Sin embargo, la aplicación de este proceso, implica el riesgo del cambio de las propiedades mecánicas del material base soldado, debido al aporte de calor durante el soldeo. Este riesgo se evita aplicando procesos de metalización en frío.

Durante el desarrollo de este Informe de Trabajo Profesional, se utiliza el Proceso de Metalización o Termorociado por arco eléctrico Arc Spray, para recuperar la dimensión de un eje de motor eléctrico, desgastado por la acción del retenedor de aceite.

Para ello se hace uso de un eje SAE 1045 de $\Phi = 32$ mm.

Para determinar los resultados de la metalización, se hace un análisis de las propiedades mecánicas y estructura metalográfica del eje previo y posterior a la metalización.

Una vez efectuado el proceso de metalización, siguiendo los pasos detallados en el desarrollo del Tema, se hace el análisis de resultados. El cual me permite concluir que la metalización recuperó la dimensión del eje y a su vez, mejoró las propiedades superficiales del mismo, aumentando su resistencia al desgaste, y por ende, su vida útil.

La Metalización no provocó cambios en la estructura original del eje, ya que su aplicación no sobrepasó los 70° C y la unión metal base-metal de aporte es sólo por difusión.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. LA METALIZACIÓN.....	3
1.1 Concepto de Metalización.....	3
1.2 Tipos de Metalización.....	11
1.2.1 Metalización en frío.....	11
1.2.2 Metalización en caliente.....	12
1.3 Ventajas y Desventajas de la Metalización.....	15
CAPÍTULO 2	
2. PROCESO DE METALIZACIÓN POR ARC SPRAY.....	28
2.1 Generalidades.....	28
2.2 Parámetros que intervienen durante el proceso.....	33

2.3 Tipos de Recubrimiento.....	35
2.4 Aplicaciones en la Industria.....	36
2.5 Equipo utilizado.....	37

CAPÍTULO 3

3. METALIZACIÓN DEL EJE DE MOTOR ELÉCTRICO POR ARC

SPRAY.....	39
3.1 Características del eje.....	39
3.2 Análisis Metalográfico Pre-Metalización.....	40
3.3 Determinación de las Propiedades Mecánicas Pre-Metalización.....	44
3.4 Metalización de eje.....	49
3.4.1 Preparación de la superficie a metalizar.....	49
3.4.2 Selección de recubrimientos.....	58
3.4.3 Aplicación de recubrimiento.....	63
3.4.4 Mecanizado final del eje.....	71
3.5 Análisis Metalográfico Post-Metalización.....	77
3.6 Determinación de las Propiedades Mecánicas Post-Metalización.....	78
3.7 Análisis de Resultados.....	95

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
--	----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

°C	Grados Centígrados
°F	Fahrenheit
HVOF	High Velocity Oxi Fuel
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
plg	Pulgada
m / s	Metro por Segundo
m / min	Metro por Minuto
pie / min	Pie por Minuto
TAFA	Equipo de Termorociado
psi	Libra por Pulgada Cuadrada (Siglas en Inglés)
Kg	Kilogramo
gr	Gramo
oz	Onza
MPa	Mega Pascal
Kg / hr	Kilogramo por Hora
ANSI	Instituto Nacional Americano de Normalización (Siglas en Ingles)
AWS	Sociedad Americana de Soldadura (Siglas en Inglés)

kPa	Kilo Pascal
pie ³ / min	Pie Cúbico por Minuto
m ³ / hr	Metro Cúbico por Hora
dB	Decibeles
hr / día	Hora por Día
OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (Siglas en Inglés)
V	Voltios
A	Amperio
kw	Kilovatio
Ω	Ohmio
Kg / hr	Kilogramo por Hora
Standoff	Distancia de Aplicación
AISI	Sociedad Americana del Hierro y el Acero (Siglas en Inglés)
Nital	Ácido Nítrico
SAE	Sociedad Americana de Ingenieros
Hv	Dureza Vickers
Rc	Dureza Rockwell
PH	Grado de Acidez
mils	Milésima de Pulgada
RPM	Revoluciones por Minuto
rev	Revolución

ASTM	Sociedad Americana para Prueba y Ensayo de Materiales (Siglas en Inglés)
AFNOR	Instituto de Normalización de Francia (Siglas en Inglés)
DIN	Instituto de Normalización de Alemania (Siglas en Inglés)
JIS	Instituto de Normalización del Japón (Siglas en Inglés)
MIL	Instituto de Normalización Militar de Estados Unidos (Siglas en Inglés)

SIMBOLOGÍA

Ni	Níquel
Al	Aluminio
Cr	Cromo
C	Carbono
D_e	Diámetro del eje
L_e	Longitud del eje
P	Carga aplicada
D	Longitud diagonal de la huella
W	Rata de deposición
t_{re}	Tiempo de recorrido de la pistola
A_m	Área metalizado
W_{RB}	Peso de recubrimiento base
E_{RB}	Espesor de recubrimiento base
C_{RB}	Cobertura de recubrimiento base
W_{RF}	Peso de recubrimiento final
E_{RF}	Espesor de recubrimiento final
C_{RF}	Cobertura de recubrimiento final
t_R	Tiempo de rociado
R_R	Rapidez de rociado del metal

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Diagrama del Termorociado.....	5
Figura 1.2 Sección transversal de un depósito Termorociado.....	6
Figura 1.3 Equipo de protección del operario para realizar el Termorociado en espacio confinado.....	24
Figura 2.1 Esquema de Funcionamiento del Proceso Arc Spray.....	31
Figura 2.2 Equipo Arc Spray TAFE 8830.....	38
Figura 3.1 Muestra sumergida en agua para el desbaste.....	41
Figura 3.2 Estado final de la muestra a ensayar.....	42
Figura 3.3 Estructura Metalográfica Pre-Metalización de la sección transversal del eje a 200x.....	43
Figura 3.4 Estructura Metalográfica Pre-Metalización de la sección transversal del eje a 500x.....	44
Figura 3.5 Equipo utilizado para medir la dureza.....	48
Figura 3.6 Estado original del eje.....	52
Figura 3.7 Estado del eje después del mecanizado.....	53
Figura 3.8 Pre-maquinado usado en el eje a rociar.....	54
Figura 3.9 Cuchilla a usar para el roscado del eje.....	55
Figura 3.10 Inicio del maquinado de rosca en el eje.....	56
Figura 3.11 Eje completamente roscado en el torno en el área a metalizar.....	57

Figura 3.12	Protección del área adyacente a ser rociada.....	58
Figura 3.13	Aplicación del alambre base BOND ARC 75B.....	59
Figura 3.14	Estado del eje luego de aplicado el alambre base.....	60
Figura 3.15	Aplicación del alambre final 60T.....	61
Figura 3.16	Estado del eje luego de aplicado el alambre final.....	62
Figura 3.17	Control de temperatura durante el rociado.....	63
Figura 3.18	Forma de Cuchilla de Torno recomendada para el maquinado.....	72
Figura 3.19	Maquinado final del eje rociado.....	74
Figura 3.20	Estructura metalográfica a 100x del termorociado.....	77
Figura 3.21	Vista a 100x del material rociado.....	78
Figura 3.22	Dispositivo para ensayo de tracción de acuerdo a la Norma ASTM-C633 (medidas em mm).....	85
Figura 3.23	Tipos de fracturas resultantes de la prueba de adhesión.....	88
Figura 3.24	Resultados de la Prueba de Doblado.....	90
Figura 3.25	Técnicas usada para medidas de ultrasonido.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Temperatura de fuentes de calor para los diferentes procesos de Metalización.....10
Tabla 2	Velocidad promedio de impacto de las partículas de material de aporte al sustrato.....11
Tabla 3	Características Químico-Mecánicas de los materiales de aporte.....14
Tabla 4	Características y Propiedades de los distintos Procesos de Termorociado.....18
Tabla 5	Duración del nivel de ruido admisible en el ser humano.....25
Tabla 6	Resultados de ensayo de dureza Pre-Metalización aplicado al eje.....49
Tabla 7	Profundidad de Pre-maquinado.....64
Tabla 8	Velocidad en RPM vs Diámetro del eje a maquinar.....73
Tabla 9	Lista de Materiales Sellantes.....76
Tabla 10	Resultados de ensayo de dureza Post-Metalización aplicado al eje Metalizado.....79

ÍNDICE DE APÉNDICES

- Apéndice A Nombre, Características, Propiedades y Aplicaciones de Alambres para Termorociado TAFA
- Apéndice B Propiedades y Características de los Alambres usados en el Termorociado del eje
- Apéndice C Rendimiento Nominal de depósito de alambre para Proceso Arc Spray TAFA
- Apéndice D Peso de recubrimiento típico Proceso Arc Spray

INTRODUCCIÓN

Por la acción del trabajo continuo el que están sometido los diferentes elementos de máquinas, en los distintos procesos industriales, estos se desgastan, y se deterioran, perdiendo su capacidad para cumplir eficientemente su trabajo.

Por esta razón se desarrollaron procesos para recuperar las piezas desgastadas y prolongar la vida útil de las mismas.

Durante el presente Informe de Trabajo Profesional se desarrolla la recuperación del eje de un motor eléctrico, desgastado por la acción del retenedor de aceite, empleando un proceso de metalización en frío, como es el Arc Spray.

En los Capítulos 1 y 2 se desarrollan los conceptos básicos de los procesos de metalización. Se incluyen normas de seguridad muy importantes de cumplir para garantizar una adecuada protección del personal que opera los equipos.

En el Capítulo 3, haciendo uso del equipo de metalización en frío por Arc Spray TAFE 8830, se procede a metalizar un eje SAE 1045 de $\Phi = 32$ mm

(simulando un eje de motor eléctrico desgastado). Durante este proceso se aplican al eje, dos tipos de alambres de aporte (aleaciones de Ni-Al y Cr al 13%), los cuales proporcionarán al eje mayor resistencia al desgaste.

Se realiza un análisis de los resultados obtenidos de la metalización y se procede con las conclusiones y recomendaciones respectivas.

Como Apéndices se incluye un listado de aplicaciones posibles de realizar con el proceso metalización Arc Spray.

CAPÍTULO 1

1. LA METALIZACIÓN

1.1. Concepto de Metalización

La metalización es un proceso para la creación de recubrimientos superficiales funcionales. En el cual un material de revestimiento metálico o no metálico finamente dividido es depositado en forma fundida o semi-fundida sobre un substrato (material base) para formar un depósito.

Este proceso también se lo conoce como Termorociado, Rociado Térmico o Thermal Spray.

El proceso se describe como la proyección de partículas de material fundidas contra un material base. La velocidad de proyección de las partículas depende del equipo usado, y es la que permite que se

incrusten y se adhieran al sustrato, y entre ellas, conformando así un recubrimiento denso, fuertemente adherido al material base y con una dureza generalmente mayor a la del sustrato.

Mediante la metalización se recuperan piezas vitales de maquinaria industrial, averiadas o desgastadas por el uso, o el medio que lo rodea, superando los estándares originales de la pieza nueva.

Generalidades del Proceso de Metalización

La metalización comprende el calentamiento del material de aporte, ya sea en forma de polvo o de alambre, hasta obtener un estado fundido o semi-fundido. Este material se transporta mediante una corriente de gas o de aire comprimido para su depósito, creando una estructura en la superficie de un determinado sustrato.

Durante el proceso se emplea una fuente generadora de calor y un material de aporte que se alimenta en forma de polvo o de alambre. Con la ayuda de la fuente de calor, el material de aporte que se alimenta, se funde y se proyecta sobre la superficie previamente preparada.

En la Figura 1.1 se presenta un diagrama esquemático del proceso de metalización. En el cual se puede apreciar la partícula del material de aporte (polvo o alambre) trasladándose, por la energía

suministrada por la fuente de poder del equipo, desde la unidad de proyección (pistola o antorcha del equipo), hasta el substrato o material base a metalizar.

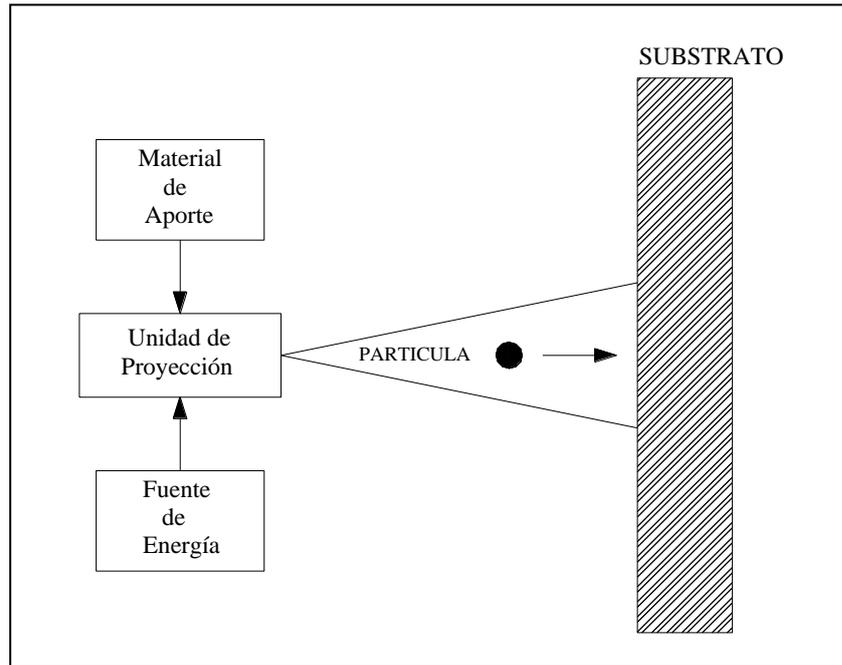


Figura 1.1: Diagrama del Termorociado

En la metalización o termorociado ocurren dos etapas definidas:

- (1) Atomización
- (2) Deposición

En la atomización tiene lugar el rompimiento del material de aporte fundido líquido en "gotitas" y en la deposición se presentan dos momentos: (2.1) donde la gotita está viajando e interactúa con el gas

de atomización y (2.2) donde la gotita impacta e interactúa con el sustrato.

La Figura 1.2, ilustra la sección transversal típica de un sustrato después de aplicado el material de aporte (revestimiento) mediante el proceso de rociado térmico. El sustrato posee una alta rugosidad, la cual permite aumentar el área rociada, y por ende aumentar la adhesión del revestimiento al sustrato. En el depósito se encuentra también, la presencia de poros, inclusiones de óxido, propios del proceso. La adhesión entre capas del revestimiento está dada por la resistencia cohesiva entre sus partículas.

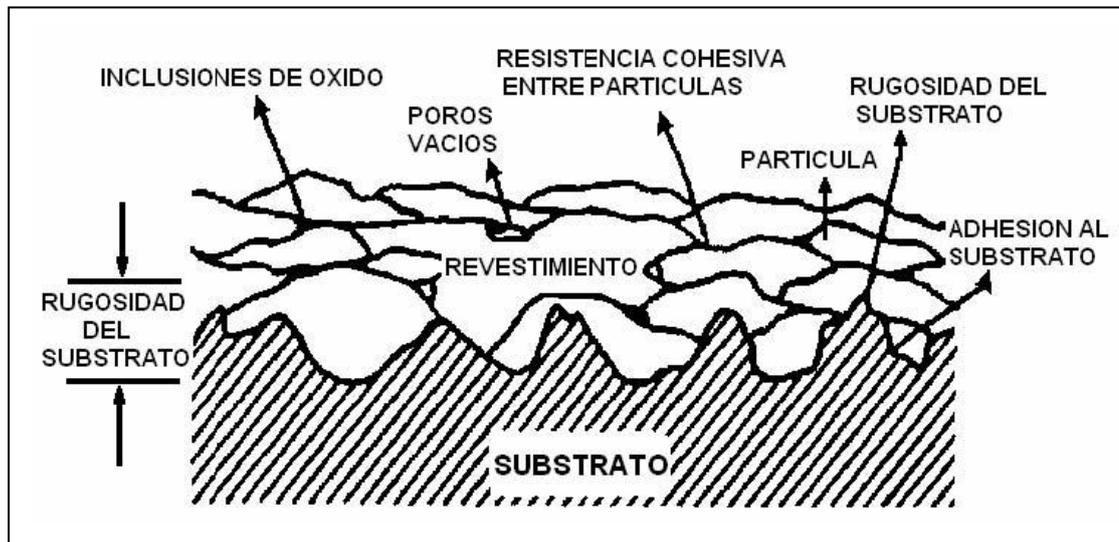


Figura 1.2: Sección transversal de un depósito Termorociado

La naturaleza del proceso es sinérgica, o sea, existen diversas variables y componentes involucrados, los cuales, actuando juntos y

apropiadamente aplicados, producen un efecto mayor, lo que se traduce en una metalización óptima.

La pistola de aspersion, genera el calor necesario, utilizando gases combustibles o un arco eléctrico, cuando los materiales sólidos son calentados, ellos cambian a un estado plástico o fundido y son acelerados por un gas comprimido. Las partículas calentadas son impulsadas hacia el substrato y chocan con su superficie, en donde se aplanan y forman finas partículas lenticulares que se solidifican, conformándose y adhiriéndose a las irregularidades de la superficie preparada, y entre sí, formando una estructura laminar. La unión entre el depósito rociado térmicamente y el substrato puede ser mecánica, metalúrgica, química, física o una combinación de estas formas.

Las variaciones básicas del proceso de rociado térmico ocurren en los materiales utilizados para la aspersion, en el método de calentamiento y en el método de propulsión de los materiales hacia el substrato.

Los revestimientos rociados térmicamente tienen tres aspectos básicos:

SUBSTRATOS

Los sustratos donde los revestimientos son aplicados incluyen metales, cerámicas, vidrios, polímeros y maderas. No todos los materiales de aspersión pueden ser aplicados sobre todos los sustratos, algunos requieren técnicas especiales. La preparación del sustrato antes de la aspersión es requerida para todas las variaciones del proceso y es virtualmente la misma para cada proceso.

Dos pasos importantes son la limpieza de la superficie, para eliminar la contaminación que disminuirá la unión del revestimiento al sustrato y el mantenimiento de rugosidad superficial o irregularidades que permitirán la adhesión del revestimiento y crear una mayor área de superficial efectiva.

La preparación adecuada del sustrato antes de la aplicación del revestimiento es la etapa más crítica que incidirá en la resistencia de la unión, por ende en la adhesión del revestimiento al sustrato.

ENLACE DE UNIÓN

La unión entre el revestimiento y el sustrato puede ser mecánica, química, metalúrgica, física o una combinación de estas. La adhesión depende de una serie de factores, tales como el material

del revestimiento, condición del substrato, grado de rugosidad de la superficie, limpieza, temperatura de la superficie antes y después de la aspersión y velocidad de impacto de la partícula.

ESTRUCTURA DEL REVESTIMIENTO

La estructura depositada y la química del revestimiento rociado térmicamente al ambiente, son diferentes de aquellas del mismo material en forma manufacturada antes de ser rociados térmicamente. Las diferencias en la estructura y la química son debidas a la naturaleza del revestimiento, la reacción con los gases del proceso y la atmósfera en el entorno del material, cuando está en el estado fundido. En el caso de que el aire u oxígeno sean usados como gases del proceso, óxidos del material aplicado son formados y se hacen parte integral del revestimiento.

Los revestimientos de metal tienden a ser porosos, frágiles y a tener una dureza diferente a la del substrato, en función de la presencia de poros. La estructura rociada térmicamente de los revestimientos será similar en su naturaleza laminar, pero presentará características variables, dependiendo del proceso, de la técnica empleada y del tipo de material aplicado. La densidad del depósito rociado varía con la velocidad de las partículas y la temperatura de la fuente de calor del proceso de metalización seleccionado.

En la Tabla 1, se presenta los rangos de temperatura de aplicación del material de aporte, de acuerdo a la fuente de calor usada, en los diferentes procesos de metalización. De esta tabla se observa que tanto para los distintos tipos de combustibles, así como, para el proceso arc spray (fuente arco eléctrico), la temperatura de aplicación oscila entre los 2,500 a 3,000 °C.

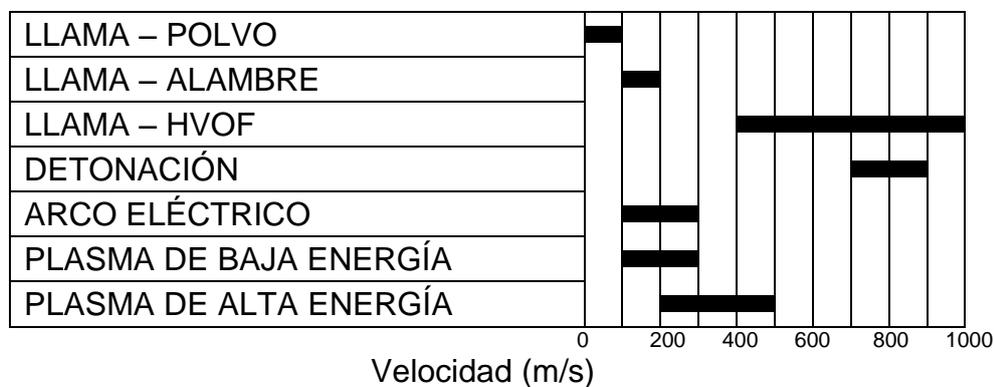
Tabla 1: Temperatura de fuentes de calor para los diferentes procesos de Metalización

FUENTE	TEMPERATURA (°C)
Propano, Oxígeno	2,526 – 2,640
Gas Natural, Oxígeno	2,538 – 2,735
Hidrógeno, Oxígeno	2,660 – 2,690
Propileno, Oxígeno	2,843
MAPP*, Oxígeno	2,927
Acetileno, Oxígeno	3,000 – 3,100
Arco Eléctrico	2,500 – 3,000
Arco Plasma	2,200 – 28,000

* Gas: Metil Acetileno Propadieno

La Tabla 2, indica la velocidad promedio de las partículas de material de aporte que adquieren en su etapa de deposición cuando impactan e interactúan con el sustrato. Esta velocidad está en función del proceso de metalización empleado y la fuente de energía usada.

Tabla 2: Velocidad promedio de impacto de las partículas de material de aporte al sustrato



De esta tabla se determina que la velocidad de las partículas que impactan al sustrato, en el proceso de metalización a aplicar para la recuperación del eje de motor, oscila entre 100 a 300 m/s. La mayor de velocidad de partículas al sustrato, la tiene el proceso de metalización por llama HVOF (High Velocity Oxi Fuel).

1.2. Tipos de Metalización

Los procesos de metalización se clasifican de acuerdo con el método de generación de calor.

1.2.1. Metalización en Frío

Estos procesos utilizan la energía eléctrica como fuente de calor. Comprende 2 grupos:

Grupo I: Eléctrico

- Arco Eléctrico, Arc Spray (TAFA)
- Arco Eléctrico con Propulsión (Jet)

Grupo II: Plasma

- Plasma de Arco No-Transferido (PSP)
- Plasma de Arco Transferido (PTA)

1.2.2. Metalización en Caliente

Utiliza gases combustibles como fuente de calor.

Comprende tres procesos:

- Llama (Oxígeno-Acetileno)
- HVOF
- Detonación

Materiales de Aplicación

Los consumibles (material de aporte) que se utilizan, son en forma de polvo, varilla o alambre:

Aceros al Carbono

Aceros Inoxidables: Serie 300, 400

Aluminio

Cobre

Bronce

Molibdeno

Zinc

Monel (Aleaciones de Níquel)

Babbitt (Aleación de Bronce)

Carburos de: Cromo, Tungsteno, Titanio

Cerámicos (Óxidos de Aluminio, Zirconio, Cromo)

Polímeros

Nylon

En la Tabla 3 se indica las características químico – mecánicas de los materiales de aporte más usados en la industria, para el proceso de termorociado por Arc Spray.

Cada alambre tiene su aplicación en función de las condiciones de operación, ambientales y servicio a las que está expuesto el sustrato a metalizar.

Los alambres de zinc, son muy usados en grandes cantidades en la industria metalúrgica para el galvanizado de tuberías.

Tabla 3: Características Químico – Mecánicas de los materiales de aporte

CARACTERÍSTICAS QUÍMICO – MECÁNICAS					
	Tracción	Corrosión Ácida	Corrosión Alcalina	Abrasión	Fricción
Aceros al Carbono	++++	+	++	++++	++++
Aceros Inoxidables	++++	++	++++	+++	+++
Aluminio	++	+	++++	+	+
Bronce	++++	+	++++	+	++
Zinc	++	+	++++	+	+
Babbit	++++	+	+	+	++
Carburos de Tungsteno	+++++	+	+	+++++	+++++
Cerámicos	++++	+++++	+++++	++++	+++++

Resistencia:

+++++ Excelente
+ Bajo

Dependiendo de la aplicación de la pieza o elemento de máquina, (material base) a metalizar, se selecciona el tipo de material de aporte más adecuado para resistir las condiciones de servicio del material base. Por ello es necesario, definir claramente estas condiciones.

Para el caso del eje de motor eléctrico a metalizar, el material de aporte a seleccionar es el acero inoxidable, ya que de acuerdo a la

Tabla 1.3, este material soporta mayor tracción, tiene una buena resistencia a la corrosión, así como, posee una buena resistencia a la abrasión y fricción. Estas condiciones de servicio, son las que soporta el eje por la acción del rodamiento y el retenedor de aceite.

1.3. Ventajas y Desventajas de la Metalización

VENTAJAS

1) Resistencia al desgaste por:

- Abrasión
- Erosión
- Fricción
- Cavitación

2) Resistencia al desgaste por Corrosión:

- Ácidos
- Gases sulfurosos
- Solventes
- Altas temperaturas

3) Recuperación Dimensional

- Recupera dimensiones (diámetro de ejes) originales de elementos mecánicos.

- El recubrimiento tendrá las mismas o mejores características que el material original.

DESVENTAJAS:

- 1) Se debe realizar una adecuada preparación del sustrato o superficie a metalizar.
- 2) No resiste esfuerzos cortantes.
- 3) Baja resistencia al impacto. Elevadas cargas puntuales podrían desprender el metalizado.
- 4) La resistencia a la tracción o nivel de adherencia está en función del proceso de metalización empleado, y puede llegar hasta los 10,000 psi (Arc Spray, equipo TAFE).

En la Tabla 4 se menciona las características y propiedades de los distintos procesos de metalización existentes en la actualidad.

De esta tabla se puede hacer las siguientes acotaciones:

- 1) El proceso Arc Spray, produce una velocidad de partícula baja comparada con los procesos por plasma y HVOF, así como, una baja adherencia.

- 2) El proceso de Arc Spray genera mayor porcentaje de óxidos, comparada con estos mismos procesos de plasma y HVOF.
- 3) Sin embargo, en cuanto al porcentaje de porosidad presente durante la aplicación, es el mismo en los tres procesos.
- 4) La ventaja del proceso Arc Spray, radica en la velocidad de deposición del material de aporte, esta es la mayor de los cuatro procesos mencionados en la tabla.
- 5) Otra ventaja del proceso de Arc Spray, es que permite un espesor de depósito de hasta 10 mm.

Tabla 4: Características y Propiedades de los distintos Procesos de Termorociado

	Velocidad de la partícula (m/s)	Adherencia (MPa)	Contenido de óxido (en metales) %	Porosidad %	Velocidad de la deposición (kg/hr)	Espesor típico del depósito (mm)
Llama	40	< 8	10-15	10-15	1-10	0.2-10
Arc Spray	100	10-30	10-20	5-10	6-60	0.2-10
Plasma	200-300	20-70	1-3	5-10	1-5	0.2-2
HVOF	200-300	> 70	1-3	5-10	1-5	0.2-2

Riesgos y Precauciones en el Proceso de Termorociado

Algunos riesgos en salud y seguridad están presentes en el rociado térmico. Esto incluye procesos de preparación y acabado, así como el proceso de aspersión en sí. En general, los riesgos asociados con el proceso de aspersión térmica son los mismos encontrados en los procesos de soldadura y está regulada en las normas ANSI/AWS Z49.1 “Safety and Welding and Cutting”, en la ANSI Z87.1 “Standard Practices for Respiratory Protection” y en la ANSI Z89.1 “Standard Practices for Industrial Head Protection with low voltaje hazards”. Es recomendable que todo el personal relacionado al proceso se familiarice con las normas y procedimientos referentes de seguridad. Estas referencias incluyen factores como la manipulación de gases, operación y mantenimiento de antorchas de aspersión, riesgos de los sistemas abrasivos, protección individual, entre otros.

Riesgos en el uso de los Equipos de Termorociado

Se debe contar con buenos equipos de extracción de polvo y de humo, ya que todos los procesos de rociado térmico producen polvo y humo. Por lo tanto, la extracción o la ventilación adecuada para quitar este polvo y humo del entorno de trabajo particular deben ser

proporcionadas. Además, si exponen al operador a este ambiente, debe ser considerado un equipo de respiración conveniente.

Los riesgos referentes a los equipos pueden ser evitados siguiéndose las recomendaciones y procedimientos especificados por los fabricantes, tanto en el uso, como en la inspección y mantenimiento. Hay que tener cuidado con los gases (utilización, manipulación y almacenamiento), agua y conexiones eléctricas que reducirán la mayoría de los riesgos y problemas. Aceites o grasas, no deben ser usados en equipos de oxígeno, pues puede ocurrir una explosión; sólo lubricantes especiales resistentes a la oxidación pueden ser usados. Presiones de acetileno superiores a 103 kPa (15 psi) son peligrosas y no deben ser usadas. Cuando esta presión sea insuficiente para la aplicación, otro gas combustible debe ser utilizado. Aleaciones con contenidos mayores del 65% de cobre o plata no deben ser usadas en sistemas de acetileno, pues compuestos explosivos peligrosos pueden ser formados.

Los equipos de rociado térmico por plasma y arco eléctrico utilizan altos voltajes y amperajes. Los operadores deben, por lo tanto, conocer y seguir las instrucciones y normas de seguridad apropiadas. En el equipo de plasma, los electrodos expuestos de las

antorchas deben ser adecuadamente aterrizados y aislados. Deben de ser realizadas inspecciones periódicas en mangos, aislantes, mangueras y líneas de gas. El sistema completo deber ser desconectado antes de iniciarse cualquier tipo de reparación del sistema de potencia, consola o antorcha. Los equipos de rociado térmico por arco eléctrico deben ser frecuentemente limpiados para evitar la acumulación de partículas (polvo) metálicas.

Protección Individual durante el Proceso de Termorociado

La protección individual de los operadores de rociado térmico es similar a la de los soldadores. Cascos, mascarillas y/o gafas deben ser usadas para la protección de los ojos, rostro y cuello durante la operación, estas están descritas en ANSI Z87.1 y ANSI Z89.2. Placas filtrantes apropiadas deben proteger los ojos de excesivas radiaciones ultravioleta, infrarrojo, luminosidad visible intensa y partículas proyectadas. Ropas adecuadas (overol, ropas especiales contra radiación, guantes, etc.) deben ser suministradas, principalmente en las operaciones de chorro abrasivo y rociado térmico por plasma con arco no-transferido, donde gran cantidad de partículas abrasivas y alta radiación, respectivamente, están presentes. La protección respiratoria es otro punto que debe recibir un cuidado especial, siendo definida en función de la naturaleza, tipo

y magnitud de los gases y humos generados. La selección de los dispositivos debe estar de acuerdo con la norma ANSI Z88.2. Esta norma contiene las descripciones, las limitaciones, los procedimientos operacionales, y los requisitos de mantenimiento para dispositivos protectores, respiratorios. Cabinas con sistemas de extracción y recolección con filtros son generalmente utilizados para recolectar polvos y materiales en suspensión y para ventilar el ambiente y eliminar los humos del proceso. La selección de estos dispositivos deben seguir las disposiciones de ANSI Z88.2, a continuación se detallan algunas de sus sugerencias para aplicaciones típicas del rociado térmico:

Rociado Térmico en campo abierto

En áreas de trabajo ventiladas, la protección respiratoria adicional puede no ser necesaria. En casos extremos, tal como para el trabajo ligero de duración corta, con materias no tóxicas, pero con la exposición de polvo, mascarillas aprobadas de filtro para la protección contra vapores de polvo y metal se deben utilizar. Estas traen filtros de almohadillas y válvulas intercambiables, que se cambian cuando estén sucias o saturadas.

Rociado Térmico en espacios cerrados o semi-confinados

Un respirador de línea de aire podría utilizarse, el cual se compone de: la máscara o capucha de casco y filtro para polvo, para proteger la cabeza y el cuello para evitar que traspasen las partículas que rebotan y no se adhieren al sustrato. El flujo de aire mínimo al respirador debe ser de 4 pie³/min (6.6 m³/hr) en la parte de la cara y 6 pie³/min (10 m³/hr) al entrar al casco o la capucha. La fuente de aire al respirador deben ser respiradores de aire frescos preferiblemente a líneas de aire comprimido. La línea de aire del suministro debe suministrar al operario aire limpio y seco y tener un filtro adecuado para quitar los olores, aceites o humedad, y las partículas de la oxidación del aire generado en el compresor. El filtro de aire de la línea de la línea del suministro no proporcionará la protección contra contaminantes gaseosos, tal como, monóxido de carbono, a menos que un purificador de aire separado se utilice. Los respiradores con flujo de aire continuo proporcionan la protección respiratoria adecuada para operaciones de rociado térmico de largas jornadas y en lugares poco ventilados.

En la Figura 1.3 se observa cómo debe estar protegido el operario que va a hacer el rociado térmico en espacio confinado, de acuerdo a lo anteriormente expuesto.

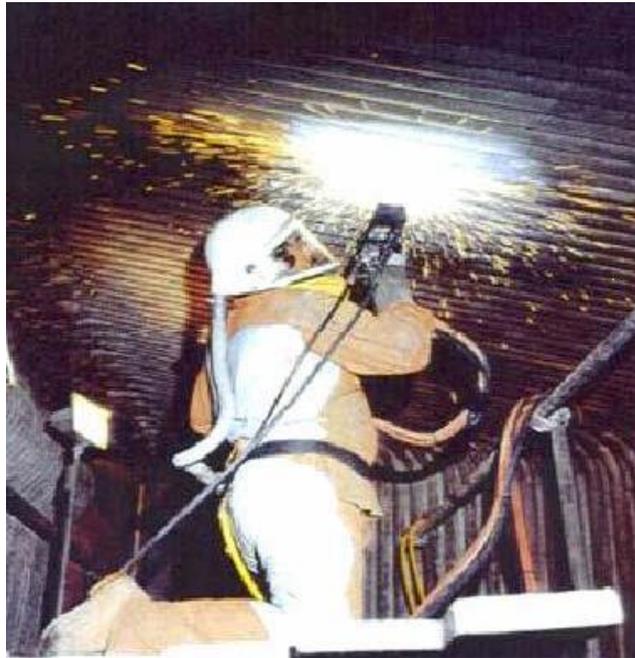


Figura 1.3: Equipo de protección del operario para realizar el Termorociado en espacio confinado

Nivel de Ruido en los Procesos de Termorociado

Cada uno de los procesos de rociado térmico tiene un nivel de ruido específico. El rango de variación va desde 80 decibeles (dB) para algunos procesos de llama oxcombustible, hasta por encima de 140 dB para los procesos hipersónicos y por plasma.

El nivel de ruido típico de un equipo de chorro abrasivo (granallado), a usar durante el proceso de limpieza del sustrato, previo al termorociado, por ejemplo, está en la franja de 80-85 dB. Estos

valores deben ser medidos en la distancia entre el equipo de aspersión y el oído del operador.

Los valores límite para exposición sin protección auditiva, en el ser humano, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Duración del nivel de ruido admisible en el ser humano

Nivel de Ruido (dB)	hr / día
90	8
92	6
95	4
97	3
100	2
102	1.5
105	1
110	0.5
115	< 0.25

Todo personal alrededor de la operación de rociado térmico debe contar con la protección de oídos, si la exposición del ruido excede las limitaciones establecidas por OSHA en el párrafo 1910.95 titulado “Occupational Safety Noise Exposure” (Estándares Profesionales de la Seguridad y la Salud).

Cuando los procesos de rociado térmico producen altos niveles de ruido, es obligatorio limitar al operario la exposición al ruido excesivo con estándares reconocidos, como la OSHA.

Materiales Tóxicos y/o Explosivos

Todos los materiales, en forma de pequeñas partículas finamente divididas, pueden ser nocivos al sistema respiratorio y aún para la piel y salud en general. Por lo tanto, siempre deben ser tomadas precauciones para la protección de los operadores, de acuerdo con el grado de agresividad del material que está siendo rociado térmicamente.

Además, un punto que merece atención es el riesgo de explosión por finos polvos metálicos. El aluminio y el zinc, en particular, son rociados térmicamente en grandes cantidades y son altamente combustibles. El aluminio y el zinc, húmedos, son capaces de hacer auto-ignición. En general, los riesgos de explosión son evitados con una ventilación adecuada de las cabinas de aspersion y la utilización de un sistema de extracción y recolección eficiente. Es importante también, mantener las cabinas siempre limpias, evitando la acumulación de residuos, principalmente cuando son aplicados materiales reactivos. Además, las fuentes de ignición se deben

evitar, por ejemplo, las cargas estáticas de los equipos rotativos, por ejemplo ventiladores.

Cuando se rocía plomo, aleaciones de plomo, cobalto y telurio, el principal peligro es la ingesta, inhalación y la subsecuente absorción de humos, polvos o vapores. Los humos y polvos de plomo y sus aleaciones (como metales patentados a base de plomo), aleaciones de cromo (tales como aceros inoxidable, níquel-cromo y óxido de cromo) y telurio son altamente tóxicos y potencialmente peligrosos. Por lo tanto, para rociar térmicamente, tales materiales, se debe asegurar de tener una adecuada ventilación y protección respiratoria para los operadores, independiente de los valores de concentración de tales materiales.

CAPÍTULO 2

2. PROCESO DE METALIZACIÓN POR ARC SPRAY

2.1. Generalidades

En el proceso de rociado térmico por arco eléctrico, conocido también como arc spray, el calentamiento y la fusión ocurren cuando dos electrodos consumibles, cargados eléctricamente con cargas opuestas (un alambre es positivo “ánodo”, el otro negativo “cátodo”) que se encuentran inicialmente aislados uno del otro, son alimentados conjuntamente y avanzan automáticamente para encontrarse en una niebla de gas atomizante, donde una diferencia de potencial (voltaje) entre 18 y 40 V es aplicada a través de los alambres, iniciando un arco eléctrico controlado en su intersección, que funde y pulveriza las puntas de los alambres que funcionan como electrodos. Un gas, usualmente aire, es comprimido y dirigido

a través de la zona del arco, atomizando el metal fundido y proyectando las partículas sobre el sustrato previamente preparado.

Las partículas fundidas que impactan en el sustrato solidifican rápidamente para formar una capa.

Este proceso de rociado térmico por arc spray es un proceso en frío, ya que la temperatura del sustrato es baja (entre 50 a 70 °C), lo que evita que durante el proceso existan cambios metalúrgicos y distorsión del material del sustrato.

Para aplicaciones especiales, gases inertes como argón y helio pueden ser usados en vez del aire, con la finalidad de reducir la oxidación del revestimiento.

Este proceso produce una alta eficacia de deposición, buena adherencia y tiene un costo de operación relativamente bajo. Normalmente se obtienen capas densas con bajos porcentajes de porosidad y de muy buena adherencia.

La energía eléctrica en este proceso oscila entre 5 a 10 kw.

Los diámetros de alambre aplicados están entre 1.2 a 5 mm.

Un factor limitante para el proceso es el hecho de que los materiales aplicados deben ser eléctricamente conductores.

No, necesariamente los alambres aplicados deben ser del mismo tipo, aunque si deben pertenecer a una misma familia. Esto es, se puede combinar aceros inoxidable serie 300 con aceros inoxidable serie 400. Pero, no se puede aplicar una combinación de alambres de aluminio con zinc u otras combinaciones así.

Un esquema del proceso por arco eléctrico es presentado en la Figura. 2.1. Aquí se visualiza que los alambres alimentados, al funcionar el uno como conductor positivo, y el otro como conductor negativo, forman arco eléctrico al hacer contacto, y una vez atomizados, son proyectados por un chorro de aire. Los alambres ya pulverizados impactan en el material base, formando una capa de material rociado.

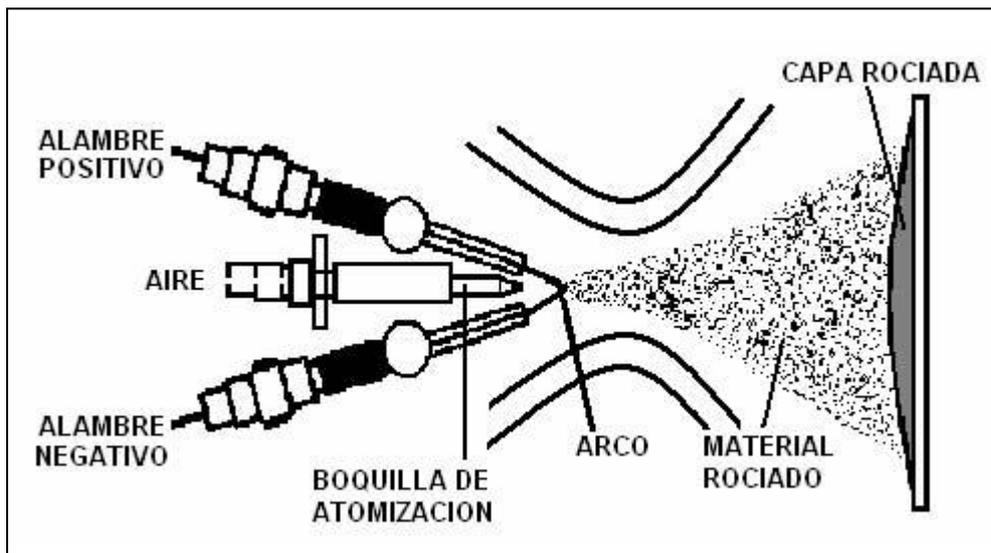


Fig. 2.1 Esquema de Funcionamiento del Proceso Arc Spray

El proceso es de fácil operación y se lo puede utilizar manualmente o de manera automatizada.

Es posible rociar una amplia gama de metales, aleaciones y compuestos de matriz metálica en alambre. Además, un limitado número de capas de carburos de tungsteno u otros materiales duros, se puede rociar también en la forma de alambre con matriz metálica donde la fase de cerámica dura se ensambla en una envoltura tubular de metal, en forma de polvo fino.

Las temperaturas del arco exceden considerablemente los puntos de fusión de los metales rociados térmicamente. Durante el ciclo de fusión, el metal rociado es supercalentado hasta un punto donde

puede ocurrir alguna volatilización, especialmente con aluminio y zinc. Las altas temperaturas de las partículas producen, después del impacto con el sustrato, interacción metalúrgica, zonas de difusión o ambos. Estas reacciones localizadas forman pequeñas zonas soldadas “microsoldaduras”, conllevando a un revestimiento con buena resistencia adhesiva y cohesiva.

Resistencias adhesivas sobre los 69 MPa (7,252 psi) son obtenidas para algunos materiales. Un efecto negativo del alto estado de energía de las partículas atomizadas es la tendencia a cambiar la composición de las aleaciones aplicadas, debido a la oxidación selectiva o la vaporización, o a la ocurrencia simultánea de estos dos fenómenos. La naturaleza de estos efectos es muy compleja, pero puede ser minimizada por un buen criterio de selección de la composición del alambre.

El proceso de rociado térmico por arco eléctrico presenta, normalmente, mayores velocidades de aspersion que los otros procesos de termorociado. En general, los depósitos por arc spray tienden a ser un poco más gruesos que los de la mejor pistola a gas, además debido a la alta temperatura hay una cierta soldadura incipiente en la cara de trabajo y la adherencia es mayor.

Por otro lado, los factores que controlan la velocidad de aplicación son la corriente de la fuente de energía (A) y la velocidad de alimentación del alambre permisible para utilizar la energía disponible. Velocidades de deposición de hasta 55 Kg/hr han sido alcanzadas para algunas aleaciones a base de níquel. El calentamiento del sustrato es menor que en los otros procesos de aspersión por llama, principalmente por no haber una llama tocando el sustrato.

El rociado térmico por arco eléctrico tiene el índice más alto de deposición de los procesos de rociado térmico y se puede utilizar para rociar grandes áreas o una gran cantidad de componentes en la cadena de producción y en operaciones repetitivas.

2.2 Parámetros que intervienen durante el Proceso

Los parámetros que intervienen durante el Proceso de Metalización por Arc Spray son:

Voltaje (V)

El voltaje (de salida) proporciona la diferencia de potencial para generar el arco eléctrico entre los dos alambres de aporte. El voltaje aplicado debe ser el recomendado por el fabricante para obtener un

rociado óptimo. Un inadecuado voltaje puede ocasionar un arco inestable o una fusión a temperatura excesiva de los alambres de aporte, que cause una alteración en sus propiedades.

Corriente Eléctrica (A)

La corriente eléctrica (de salida) proporciona una mayor o menor velocidad de aporte. Se debe aplicar el amperaje recomendado por el fabricante, ya que un amperaje demasiado elevado, si bien nos proporcionará una mayor cantidad de material aportado al sustrato, sin embargo, puede causar distorsiones en el material base y por ende en una inadecuada aplicación.

Presión de Aire

La presión de aire, así como el flujo de aire, son fundamentales en el proceso. Existen valores mínimos de presión, bajo los cuales el equipo no realiza el rociado.

Tipo y diámetro de Alambre

El tipo de alambre a rociar está en función de las condiciones de servicio al que está sometido el sustrato, el recubrimiento debe

proporcionar la protección más adecuada para resistir estas condiciones, mejorando las propiedades originales del material base.

El diámetro del alambre lo proporciona el fabricante. Básicamente existen dos diámetros: 1.6 mm y 2 mm.

Distancia de Aplicación (Standoff)

Es la distancia entre el arco eléctrico formado por los dos alambres de aporte y la superficie del substrato. Si esta distancia es muy corta, las partículas que llegan al substrato estarán crudas; por el contrario, si la distancia es muy larga, las partículas que llegan al substrato llegarán plastificadas. En ninguno de los dos casos la aplicación del rociado nos proporcionaría una buena liga entre el material base y el material de aporte.

El standoff debe ser, por tanto, el que recomienda el fabricante y el cual está en función del tipo de alambre a rociar.

2.3. Tipos de Recubrimientos

Por el principio de operación del equipo, se pueden usar todo tipo de alambres conductores.

En el Apéndice A se especifica la gama de alambres: características, propiedades y aplicaciones con los que cuenta el proveedor (TAFA) para las diferentes aplicaciones.

2.4. Aplicaciones en la Industria

Los usos típicos incluyen:

- Recuperación de los componentes de ingeniería tales como: ejes, cojinetes, con aleaciones de acero y bronce.
- Rociado de estructuras grandes, tales como puentes e instalaciones en zona costera para dar la protección de corrosión con zinc y aluminio.
- El rociado térmico de las cubiertas de componentes electrónicos con cobre, zinc y aluminio, proporcionan un blindaje contra la interferencia electromagnética en las capas conductoras.

Hay razones particulares por las que el rociado térmico por arco eléctrico se puede seleccionar sobre otras técnicas superficiales de ingeniería y estas pueden incluir una combinación de las siguientes:

- La necesidad de costos más bajos y de velocidades más altas de aspersion.

- Recubrimiento de grandes áreas por equipos automatizados o manuales de rociado térmico.
- El funcionamiento de capa requerido puede tolerar cierto óxido y porosidad, con una adherencia mejor y velocidades más altas de deposición, que las capas producidas usando rociado térmico por llama.

2.5. Equipo Utilizado

El equipo a utilizar para el desarrollo de este Informe de Trabajo Profesional, es el equipo de Arc Spray marca TAFE modelo 8830, el cual es considerado clásico por su fiabilidad y economía.

Características:

- Diseño de alimentador.
- Manejo de aire de motor.
- Capacidad de alimentación de alambre de 1.6 mm o 2.0 mm.
- Construcción robusta.
- Rango de operación de hasta 350 A.
- Diseñado para operaciones manuales.

Componentes del Equipo:

El equipo consta básicamente de:

- Rectificador de corriente de 350 A.
- Consola de Control 8830.
- Pistola 8830.

En la Figura 2.2 se observa el equipo de arc spray TAFE modelo 8830, el cual se utilizará para el presente proyecto.



Figura 2.2: Equipo Arc Spray TAFE 8830

CAPÍTULO 3

3. METALIZACIÓN DEL EJE DE MOTOR ELÉCTRICO POR ARC SPRAY

3.1. Características del eje

El eje es un acero AISI 1045 de 32 mm (1.25 plg) de diámetro.

Es un acero de medio contenido de carbono (0.45%). Estos aceros son utilizados principalmente en elementos de máquinas como: ejes, engranajes, piñones, pasadores, chavetas. En comparación con los aceros de bajo contenido de carbono: tienen buena resistencia a la tracción y mayor dureza, menor elasticidad, son templeables y difíciles de forjar. Son soldables, pero requieren de precalentamiento y de enfriamiento controlados.

Su nombre comercial es acero 760.

3.2. Análisis Metalográfico Pre-Metalización

Metalografía

La metalografía estudia, mediante el microscopio, las características de la estructura de un metal o aleación. Mediante el microscopio puede determinarse el tamaño de grano y el tamaño, forma y distribución de las diversas fases e inclusiones, características todas íntimamente relacionadas con las propiedades mecánicas de los metales. El examen de la microestructura de los metales permitirá conocer los tratamientos térmicos y mecánicos a que ha sido sometido un determinado material, y prever su probable comportamiento bajo determinadas condiciones.

El éxito del análisis microscópico depende en gran parte, del cuidado que se haya tomado en la preparación de la muestra. Lo que se pretende con la preparación de la muestra es conseguir una superficie especular, perfectamente plana y exenta de toda raya por mínima que sea.

Obtención, Preparación y Ataque de la Muestra

Para la obtención de la muestra se procede a aserrar una sección transversal de 1 cm aproximadamente del eje mediante sierra

manual. Para evitar que la muestra se caliente se la refrigera con fluido de corte.

Para el desbaste y pulido de la superficie de la sección se utilizan lijas de diferentes tamaños de grano, comenzando con la # 100. Durante esta operación es importante que la muestra no se caliente, por lo cual se la mantiene sumergida en agua.

En la Fig. 3.1, se observa la muestra a ensayar durante el proceso de pulido, inmersa en un chorro de agua, para evitar que se recaliente por el lijado.



Figura 3.1: Muestra sumergida en agua para el desbaste

Para el desbaste y pulido, el movimiento de la muestra debe ser perpendicular a la dirección de las rayas. Esto permite conocer la fase en que se encuentra el pulido, ya que, a medida que avanza la operación, las rayas más profundas van siendo reemplazadas

progresivamente por otras de menor profundidad originadas por las lijas de grano más fino. El desbaste continua hasta que la superficie esté completamente plana y libre de irregularidades, rebabas, así como de toda traza de la herramienta o de cualquier clase.

Para que la muestra quede perfectamente pulida, se aplica un pulido fino (afino). Esta operación se la realiza sobre un plato horizontal giratorio cubierto con un paño especial de lona.

En la Figura 3.2, se observa el estado final de la muestra a ensayar, se aprecia un acabado superficial tipo espejo.



Figura 3.2: Estado final de la muestra a ensayar

Luego de obtenida la superficie de la muestra libre de rayas, rebabas y geométricamente plana, se procede con el “ataque”. El ataque se efectúa por medio del reactivo químico Nital (ácido nítrico) al 2%, el cual actúa sobre la superficie pulimentada de la muestra, y permite distinguir claramente las distintas partes de la microestructura.

Análisis Metalográfico de la Muestra

Lista la muestra se la lleva al microscopio, obteniendo los siguientes gráficos:

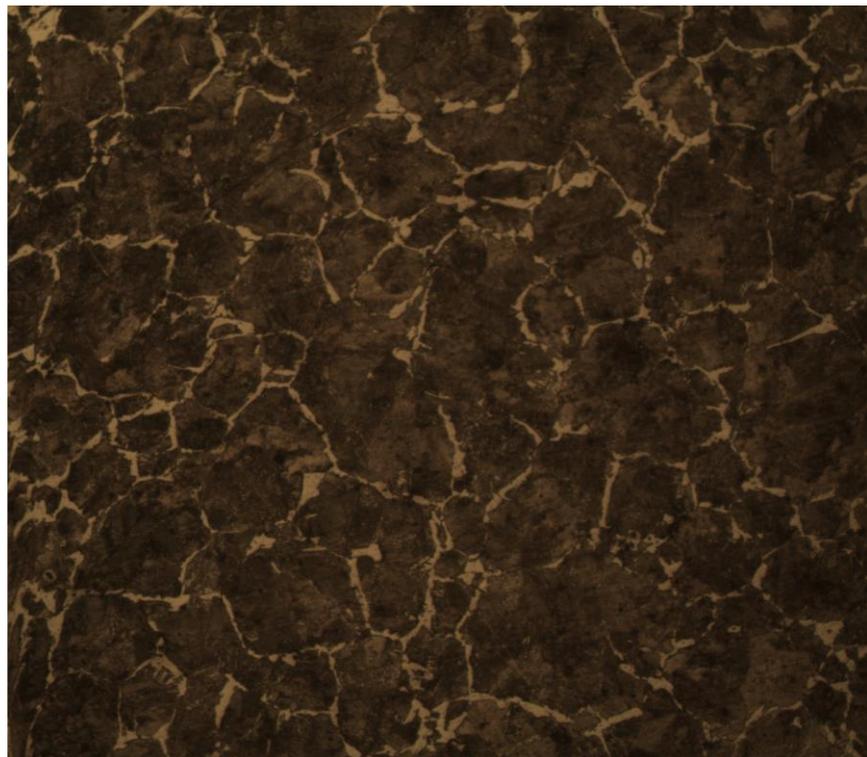


Figura 3.3: Estructura Metalográfica Pre-Metalización de la sección transversal del eje a 200x



Figura 3.4: Estructura Metalográfica Pre-Metalización de la sección transversal del eje a 500x

Los diagramas mostrados en las Fig. 3.3 y Fig. 3.4 permiten observar en el sustrato, acero SAE 1045, una estructura perlítica (tono oscuro) con una red de contornos de grano de ferrita (tono claro), con algunas placas laterales de ferrita. Así mismo, se observa un gran tamaño de grano, respecto a otras estructuras conocidas.

3.3. Determinación de las Propiedades Mecánicas Pre-Metalización

ENSAYOS MECÁNICOS

DUREZA

La dureza es una propiedad que no constituye una característica fundamental de los materiales, sino que está íntimamente relacionada con las propiedades plásticas y elásticas del mismo. Los valores que se obtienen del ensayo de dureza se refieren únicamente al método particular que se haya empleado en su determinación. Esto es debido a que los valores obtenidos mediante un método particular, son valores relativos, los cuales sólo permiten comparar unos materiales con otros, o la influencia de los tratamientos sobre un material.

La medición de la dureza constituye uno de los medios más utilizados, por su sencillez y rapidez, para la inspección y control de un determinado material o proceso de fabricación. Ya que los tratamientos térmicos modifican la dureza de los materiales.

El termorociado no modifica las propiedades del metal base, porque es un proceso en frío.

Existen muchos métodos para medir la dureza de un material, los cuales pueden clasificarse según el procedimiento que se emplee en tres grupos:

- 1) Los que miden la dureza elástica.
- 2) Los que miden la resistencia que oponen los cuerpos al corte o a la abrasión.
- 3) Los que miden la resistencia que oponen los cuerpos a la penetración. Existen tres procedimientos más utilizados en la medición de este tipo de dureza:

Ensayo Brinell

Ensayo Rockwell

Ensayo Vickers

Para el desarrollo del tema, se hace uso del ensayo de dureza Vickers.

ENSAYO DE DUREZA VICKERS

En este procedimiento se emplea como cuerpo penetrador un diamante tallado en forma de pirámide cuadrangular de 136° entre caras, normalmente se utilizan cargas variables de 1 a 120 Kg.

La dureza se halla dividiendo la carga por la superficie de la huella.

Debido a la forma del penetrador, la huella que deja en la probeta es un cuadrado, cuya diagonal se mide mediante un microscopio provisto de ocular micrométrico con índices móviles. La distancia entre índices se mide por medio de un tornillo micrométrico graduado

en milésimas de milímetro. Conocida la longitud de la diagonal, la dureza se obtiene directamente en una tabla o aplicando la fórmula:

$$Hv = 1,854 * P / d^2$$

donde:

P = carga aplicada (kg)

d = longitud diagonal de la huella

Debido a la gama amplia de carga que utiliza, la máquina Vickers, puede emplearse para medir la dureza de todo tipo de materiales, independientemente del grosor de la probeta.

El ensayo de dureza Vickers permite determinar la dureza del material a un nivel micro. Esta es una ventaja de este tipo de ensayo ya que debido a la naturaleza del aporte del termorociado, valores de macro dureza, podría conducir a resultados erróneos.

Para realizar el ensayo de dureza se hizo uso del equipo del Laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Este es un equipo Buehler Micromet S100 Series, Hardness Testing Machine.

En la Fig. 3.5 se muestra el equipo Vickers usado para practicar el ensayo de dureza, tanto antes, como después del termorociado del eje.



Figura 3.5: Equipo utilizado para medir la dureza

Para practicar el ensayo de dureza en la muestra, se siguen los siguientes pasos:

- 1) Fijar el valor de la carga a aplicar a la punta del indentador. El ensayo se lo realiza aplicando una fuerza de 500 gr.
- 2) Seleccionar el punto en la sección transversal donde se va a practicar el ensayo.
- 3) Una vez aplicada la carga, se obtienen los valores de las diagonales dejadas por el indentador en el material ensayado, se obtienen 2 valores de diagonales medidas en μm .

4) Con los valores obtenidos de las diagonales se obtiene el valor de la dureza en Vickers medido.

5) Con este dato de dureza Vickers determinado, se convierte este valor a escala Rockwell, con la que se expresarán los resultados de los ensayos.

En la Tabla 6, se presentan los resultados del ensayo de dureza obtenidos en la muestra pre-metalización.

Tabla 6: Resultados de ensayo de dureza Pre-Metalización aplicado al eje

Ensayo	Peso Aplicado (gr)	Dureza Vickers Hvp	Dureza Rockwell Rc
1	500	224.4	19.0
2	500	259.9	24.0
3	500	251.4	22.6
4	500	256.9	23.5
5	500	236.2	20.1

3.4. Metalización del eje

3.4.1 Preparación de la superficie a metalizar

Debido a que en un proceso de rociado térmico, el principal mecanismo de adherencia del substrato es el anclaje mecánico, las superficies deben ser adecuadamente

preparadas antes de aplicar la capa de revestimiento. Esta preparación depende del espesor del recargue que se desea obtener, de la naturaleza del material proyectado y de la forma de la pieza.

Los factores que influyen en la preparación del sustrato y por ende, en la adhesión del revestimiento al sustrato son:

Limpieza

Rugosidad superficial

Pre calentamiento del sustrato

LIMPIEZA

Antes de iniciar todo proceso de metalización, es preciso eliminar todo tipo de contaminante presente en la superficie, para obtener la mayor adherencia posible del revestimiento al sustrato. La superficie a metalizar debe estar limpia y libre de humedad, capas de óxido, grasa, aceites y pintura.

Los procesos utilizados para la limpieza de la superficie pueden ser divididos, en dos categorías, y se los puede emplear por separado o en conjunto:

- Limpieza Química
- Limpieza Mecánica

Limpieza Química

Detergente o limpieza alcalina

Es uno de los medios más efectivos para la remoción de grasa, aceites, polvo y partículas de metal sueltos en la superficie. La selección del reactivo químico a ser utilizado depende de la naturaleza de los contaminantes y de las condiciones superficiales. La composición y la naturaleza de los compuestos de limpieza alcalina varían de acuerdo con el material.

Para el caso de materiales ferrosos, como, el Acero SAE 1045, se usan los “alcalinos pesados”, cuyo PH varía de 12,4 a 13,8. Estas soluciones alcalinas son formadas por fosfatos, carbonatos, hidróxidos y silicatos.

Limpieza Mecánica

El proceso de limpieza mecánica se basa en el principio de abrasión, donde es posible la remoción de capas superficiales contaminadas, por la acción mecánica de un material de mayor dureza. Este tipo de limpieza puede ser hecho a través de procesos manuales, tales como: cepillado, lijado, etc.; o

procesos mecanizados, tales como: chorro abrasivo, devastado, pulido, etc.

Para el eje SAE 1045, se realiza un proceso de mecanizado del eje en el torno, a fin de eliminar la capa de óxido y cualquier contaminante presente en la superficie.

En la Figura 3.6 se aprecia el eje de, $D_e = 32$ mm y $L_e = 40$ cm, tal cual lo suministra la casa comercial proveedora de aceros.



Figura 3.6: Estado original del eje

En la Figura 3.7 se puede apreciar el eje luego del proceso de mecanizado (cepillado y torneado) para eliminar la capa de óxido y dejar su superficie lisa y sin rugosidades. Se procede

también a cortarlo a una longitud $L = 20$ cm, ya que sólo se va a metalizar esta longitud.



Figura 3.7: Estado del eje después del mecanizado

RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Después de la limpieza, la superficie debe ser preparada para que ocurra una adhesión (liga) satisfactoria del revestimiento.

Existen 2 métodos que proporcionan al substrato la máxima adherencia: Granallado y Pre-maquinado. Para el eje a metalizar, se hace uso del pre-maquinado.

Pre-Maquinado y Roscado

Consiste de un corte de forma de rosca sobre el área a ser termorociada. Este tipo de preparación correctamente ejecutada proporciona una alta adherencia y puede ser hecha en el torno.

El tipo de pre-maquinado recomendado se muestra en la Figura 3.8. Aquí se observa, que se debe evitar el vértice inferior "vivo", a 90°, en el substrato a metalizar, y en su lugar se recomienda dejar un radio de curvatura pequeño, el cual dependerá de la profundidad de maquinado.

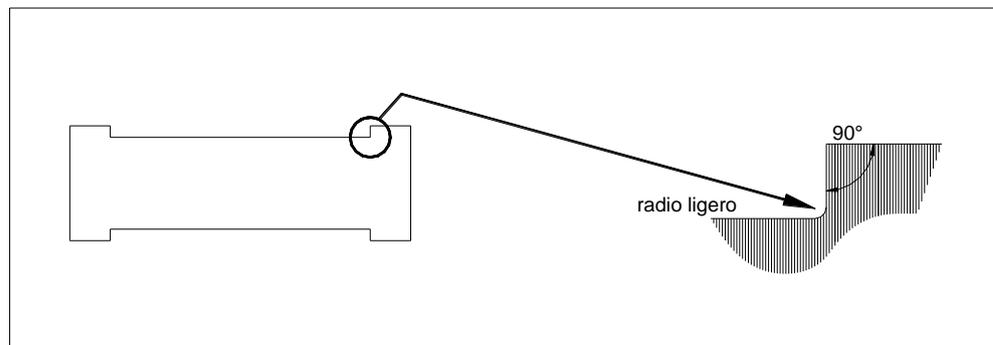


Figura 3.8: Pre-maquinado usado en el eje a rociar

Cabe recalcar que el corte de la rosca debe ser rugoso ya que si se lo hace con rosca lisa no se obtendrían los resultados esperados.

La cuchilla de corte se ubica en la forma dada en la Figura 3.9, con un ángulo de hasta 60° , con un radio tope y un ángulo de 5° .

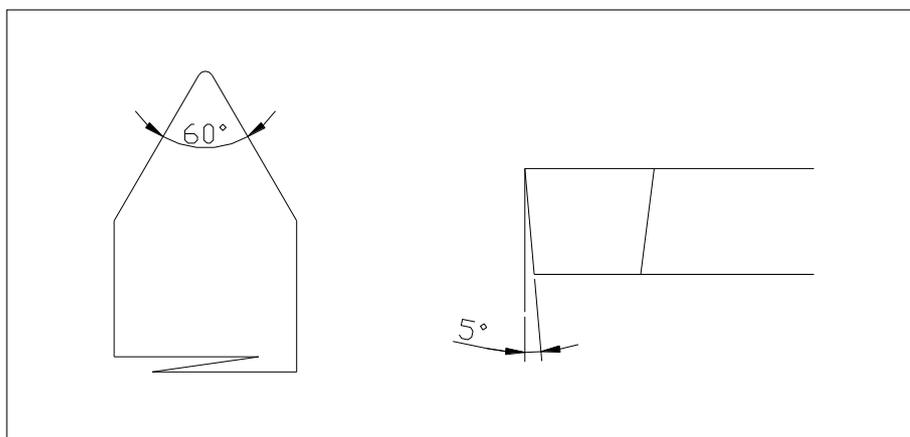


Figura 3.9: Cuchilla a usar para el roscado del eje

La herramienta de corte debe ser montada de una manera convencional y fijada para que entre en la superficie del eje entre $1/64$ y $1/32$ de plg, bajo el centro del eje de acuerdo al diámetro del eje a rociar.

Es importante que ningún fluido de corte sea usado y el corte sea realizado con una carrera de la herramienta, la cual debe ser dada en la profundidad del corte.

Para aceros se recomienda una rosca de entre 24 a 30 hilos/plg, para hierro fundido entre 10 a 12 hilos/plg. Roscas más grandes son para diámetros pequeños. Para el eje SAE

1045 a rociar de diámetro de 32 mm, se requerirá de 30 hilos/plg. La rapidez del corte en la superficie debe ser la más baja posible para la rapidez de la herramienta seleccionada. El propósito es producir un hilo de forma irregular que no tenga el mismo acabado.

Se procede a realizar el roscado en el eje SAE 1045.

En las Fig. 3.10 y Fig. 3.11 se aprecia el proceso de inicio y finalización, respectivamente, del maquinado de la rosca en el eje a metalizar.



Figura 3.10: Inicio del maquinado de rosca en el eje



Figura 3.11: Eje completamente roscado en el torno en el área a metalizar

Se procede luego, a recubrir el área adyacente a rociar, con cinta de papel, para evitar que el material rociado se adhiera a su superficie, como se aprecia en la Figura 3.12. La cinta proporciona una protección práctica de las zonas adyacentes, y sin riesgos, ya que por ser un proceso en frío, la temperatura de aplicación no sobrepasa los 60° C.



Figura 3.12: Protección del área adyacente a ser rociada

3.4.2 Selección de Recubrimientos

Una vez realizado adecuadamente el proceso de preparación del eje, se procede a efectuar el rociado de su superficie.

La selección de los recubrimientos, está basada en las recomendaciones del fabricante.

Recubrimiento Base:

Aleación Bond Arc 75B

Aleación Final:

Aleación 13% Chrome Steel 60T

Aleación Bond Arc 75 B

Es una aleación de alambre 95% Ni y 5% Al para uso exclusivo de sistemas Arc Spray.

En el Apéndice B se detalla las propiedades físicas, composición química y los parámetros de aplicación de este alambre.

En la Fig. 3.13, se aprecia al operador, completamente equipado, aplicando el alambre base BOND ARC 75B, siguiendo las recomendaciones dadas en el Apéndice B.



Figura 3.13: Aplicación del alambre base BOND ARC 75B

En la Fig. 3.14 se observa que luego de aplicado el alambre base, se mantiene visible el perfil de la rosca. Esto se debe a que la aplicación del alambre proyecta una película de iguales características que las que tenía el material base.



Figura 3.14: Estado del eje luego de aplicado el alambre base

Aleación 13 % Chrome Steel 60T

Es una aleación de alambre al 13% de Cr resistente a la corrosión.

En el Apéndice B se detalla las propiedades físicas, composición química y los parámetros de aplicación de este alambre.

En la Fig. 3.15, se aprecia al operador, completamente equipado, aplicando el alambre final CHROM STEEL 60T, siguiendo las recomendaciones dadas en el Apéndice B.



Figura 3.15: Aplicación del alambre final 60T

En la Fig. 3.16 se aprecia el estado final del eje, luego del proceso de termorociado por Arc Spray.



Figura 3.16: Estado del eje luego de aplicado el alambre final

Es importante recalcar que el proceso de termociado se lo realiza en frío, a baja temperatura, evitando de esta manera alterar las propiedades originales del material base. Este detalle se aprecia en la Fig. 3.17.



Figura 3.17: Control de temperatura durante el rociado

3.4.3 Aplicación de Recubrimientos

Espesor del depósito a rociar

El espesor óptimo del depósito rociado se lo determina por el tipo de componente y las condiciones de servicio del elemento a rociar. Así como, la rapidez de contracción del recubrimiento seleccionado.

Las condiciones servicio pueden ser reducidas a las siguientes recomendaciones:

Diámetros Externos

- Si el depósito no es una superficie de desgaste, ningún espesor mínimo se necesita especificar, a no ser que el depósito sea de espesor uniforme.
- Si el depósito es una superficie de desgaste, el espesor de depósito mínimo se determina por la máxima cantidad de desgaste de la superficie permitida en servicio, más la profundidad dada en la Tabla 7.

Tabla 7: Profundidad de Pre-maquinado

Profundidad de Pre-maquinado recomendado		
Diámetro del eje (plg)	Servicio Clase A (plg)	Servicio Clase B (plg)
Menor a 1		0.015
1 – 2	0.040	0.025
2 – 4	0.050	0.035
4 – 6	0.060	0.045
Mayor a 6	0.070	0.055

Servicio Clase A: Para ejes o muñones que operan bajo un soporte de carga pesada, tales como los cigüeñales de motores a diesel o muñones de tren de laminado, para encamisado de bombas (manguito), vástagos y pistones hidráulicos sujetos a un trabajo

severo y alta presión, donde se requiere un máximo factor de seguridad.

Servicio Clase B: Para servicio de trabajo de rodamientos, para vástagos de bombas, donde un factor de seguridad es requerido.

Nota: Es necesario añadir tolerancias de desbaste a todos los depósitos recomendados.

- El espesor máximo se lo determina por la resistencia del componente, también se toman en cuenta las consideraciones económicas.

Tolerancia de Maquinado

El espesor del depósito rociado, es el espesor del depósito final + la tolerancia del maquinado. Esto depende del diámetro del eje, pero normalmente fluctúa de 0.005 plg en el radio a para un diámetro de 1 plg, hasta 0.020 plg para un diámetro de 10 plg.

Depósito Inicial

La pistola de rociado puede ser montada al torno sobre una torre porta-pistola que recorra sobre la superficie a rociar, para el tamaño de la pieza, el espesor a rellenar y el material a rociar.

En el caso del eje SAE 1045 a metalizar, debido a su tamaño y el área a rellenar, se ejecuta la aplicación manualmente.

En el Apéndice B se indica las especificaciones para el ajuste del equipo.

El rociado es direccionado hacia toda la superficie a recubrir, especialmente hacia los bordes extremos del roscado. La dirección del chorro del rociado debe ser mantenida a 90° del eje, a una distancia de entre 5 a 7 plg. (125 a 175 mm) de la pistola al eje (standoff). La resistencia a la adherencia puede verse afectada si se usan procedimientos inapropiados.

Espesor del depósito por pase

La rapidez de trabajo sobre la superficie está regida por la rapidez de recorrido seleccionada, pero no debe ser mayor de 60 pies/min (18.3 m/min).

Idealmente el espesor aplicado para cada recorrido de la pistola sobre la superficie de trabajo no debería ser mayor de 0.005 plg (0.127 mm). La siguiente fórmula determina el tiempo de recorrido (t_{re}) aproximado en seg/plg de la pistola, para la determinación del espesor,

Donde:

D_e = diámetro del eje en plg

W = rata de deposición lb/hr/100A (Ver Apéndice A)

Entonces,

$$t_{re} = 25 * D_e / W$$

Esta fórmula se aplica para todos los metales que tengan una gravedad específica en el rango de 7.5 a 9.0, como el caso del eje a metalizar.

Para aluminio y aleaciones de aluminio la fórmula es:

$$\text{Tiempo de recorrido en seg/plg } (t_{re}) = 65 * D_e / W$$

Para el caso del eje, tenemos:

$$t_{re} = 25 * (1.25 \text{ plg}) / (10 \text{ lb/hr/100A})$$

$$t_{re} = 3.125 \text{ seg/plg}$$

Cálculo del material a usar

Para calcular la cantidad de material requerido para la aplicación del eje, se determina primero, el área a recubrir

(A_m):

$$A_m = \pi * D_e * L_e \text{ (área metalizado)}$$

Donde:

$$D_e = 1.25 \text{ plg}$$

$$L_e = 10 \text{ cm}$$

$$A_m = 3.1416 * (1.25 \text{ plg}) * (10 \text{ cm} / 2.54 \text{ cm/plg})$$

$$A_m = 15.46 \text{ plg}^2$$

Siendo: 1 pie = 12 plg

Entonces:

$$A_m = 0.107 \text{ pie}^2$$

Peso de Alambre requerido

Es el producto del área del recubrimiento, en plg^2 (A_m) * el espesor del recubrimiento (E_R), en mils (0.001 plg) * Cobertura del depósito (C_R), en $\text{oz/pie}^2 / 0.001 \text{plg}$ (ver Apéndice A).

Como la aplicación requiere de dos tipos de alambre: base (B) y final (F), se calcula el peso de cada uno de ellos.

Peso de Alambre Base BOND ARC 75B (W_{RB})

$$W_{RB} = A_m * E_{RB} * C_{RB}$$

Donde:

$$A_m = 0.107 \text{ pie}^2$$

$$E_{RB} = 0.025 \text{ plg}$$

$$C_{RB} = 0.9 \text{ oz/pie}^2 / 0.001 \text{ plg}$$

Siendo: 1 oz = 1/16 lb

Entonces:

$$W_{RB} = 0.107 \text{ pie}^2 * 0.025 \text{ plg} * 0.9 \text{ oz/pie}^2 / 0.001 \text{ plg} / 16 \text{ lb/oz}$$

$$W_{RB} = 0.15 \text{ lb}$$

Peso de Alambre Final 13% Chrome 60T

$$W_{RF} = A_m * E_{RF} * C_{RF}$$

Donde:

$$A_m = 0.107 \text{ pie}^2$$

$$E_{RF} = 0.100 \text{ plg}$$

$$W_{RF} = 0.8 \text{ oz/pie}^2 / 0.001 \text{ plg}$$

Siendo: 1 oz = 1/16 lb

Entonces:

$$W_{RF} = 0.107 \text{ pie}^2 * 0.100 \text{ plg} * 0.8 \text{ oz/pie}^2 / 0.001 \text{ plg} / 16 \text{ lb/oz}$$

$$W_{RF} = 0.54 \text{ lb}$$

TIEMPO DE ROCIADO (t_R)

El tiempo de rociado se lo estima determinando la rapidez del rociado y el número de pistolas a usar, (en el caso del eje rociado sólo se hace uso de una pistola). Asumiendo una pistola de rociado a 150 A, (amperajes más altos puede resultar en una formación excesiva de óxidos y alterar las propiedades físicas del recubrimiento).

La rapidez de rociado del metal (R_R) es:

1.5 (factor de corrección por aplicación a 150 A) * Rata de deposición (W), en lb/hr/100A (ver Apéndice A) * No. Pistolas

Entonces:

$$R_R = 1.5 * 10 \text{ lb/hr/100A} * 1$$

$$R_R = 15 \text{ lb/hr}$$

Siendo la rata de deposición (W), igual tanto para el alambre base BOND ARC 75B, como para el alambre final 13% CHROME 60T.

Entonces, el tiempo total de rociado es:

$$t_R = (W_{RB} + W_{RF}) / R_R$$

$$t_R = (0.15 + 0.54) \text{ lb} / 15 \text{ lb/hr}$$

$$t_R = 0.046 \text{ hr}$$

siendo:

$$1 \text{ hr} = 60 \text{ min}$$

Entonces:

$$t_R = 2.8 \text{ min}$$

Se debe aplicar un factor para considerar los tiempos entre capas de rociado, para el eje rociado se considera un tiempo de aplicación del 70%.

El tiempo de rociado, sería entonces:

$$t_R = 2.8/0.7 = 4 \text{ min}$$

Así también, es necesario considerar un tiempo, no estimado, entre la aplicación del alambre base y la aplicación del recubrimiento final. Este tiempo está en función de la calibración del equipo, regulación de parámetros, cambio de carretes.

3.4.4 Mecanización final del eje

Para dar el acabado final o pulido a los materiales rociados, se pueden aplicar los procesos de cepillado o torneado. Para el mecanizado del eje se hace uso del torneado.

Torneado

El torneado del eje rociado es muy similar al torneado de un material de fundición. Se hace uso de herramienta con punta de carburo, en la práctica se recomienda herramientas con formas de punta, las de hierro gris son las que proporcionan mejores resultados.

La forma de una herramienta típica se muestra en la Fig. 3.18. Se recomienda el uso de este tipo de cuchilla para hacer el maquinado del sustrato metalizado.

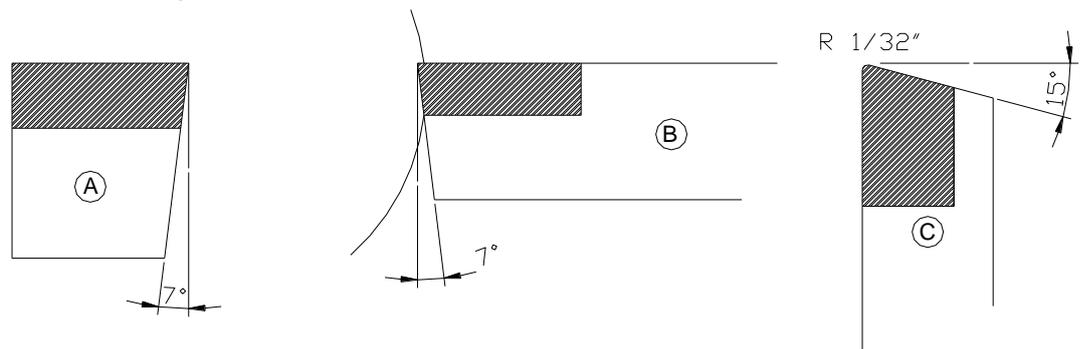


Figura 3.18: Forma de Cuchilla de Torno recomendada para el maquinado

El sobre-rociado debe ser removido, maquinando hacia afuera del área rociada.

La rapidez de la superficie de trabajo debe ser de alrededor de 60 pies/min para aceros rociados, como es el caso del eje

SAE 1045. Para las aleaciones de bronce aluminio y cobre se requiere de una rapidez superficial de 250 pies/min.

La Tabla 8, indica la velocidad en revoluciones por minuto (rpm) del eje rociado a maquinar, en función de su diámetro. También indica, que para el maquinado del eje metalizado, de $D_e = 1.25$ plg, se debe rotar el eje a 300 rpm.

Tabla 8: Velocidad en RPM vs Diámetro del eje a maquinar

Diámetro del eje (plg)	Velocidad RPM
< 2	300
2 – 4	150
4 – 6	100
6 – 8	75
8 – 10	50

Los cortes deben ser ligeros que no excedan de 0.005 plg, así como, la rapidez del recorrido, entre 0.004 y 0.006 plg/rev.

El maquinado debe empezar desde el centro de la sección rociada hacia los extremos. El pase final del pulido debe recorrer toda la sección, en una sola carrera de la herramienta.

Aunque generalmente no se recomienda refrigerante para las puntas de las herramientas, la parafina unida al cepillo ayudará a la acción de corte.

En la Fig. 3.19, se aprecia al operador del torno durante el proceso de maquinado del eje rociado, siguiendo las recomendaciones mencionadas anteriormente.



Figura 3.19: Maquinado final del eje rociado

Post-Tratamientos después del Rociado

Sellantes

La porosidad es inherente a los revestimientos realizados por aspersión térmica. Los niveles de porosidad pueden variar en porcentajes menores al 1%, hasta valores superiores del 15%, dependiendo del proceso de deposición del material rociado y de las

condiciones de operación del proceso seleccionado. La porosidad puede ser interconectada y extenderse desde la superficie hasta el sustrato. Los sellantes son usados como postratamientos para llenar estos poros, las principales razones para sellar los revestimientos rociados térmicamente son:

- Prevención o disminución de la corrosión en la interfase sustrato/revestimiento.
- Aumento de la vida del revestimiento.
- Prevención de fuga de fluidos y presión en ciertos componentes de máquinas.
- Prevención de la contaminación con residuos del esmerilado en el revestimiento.
- Mantenimiento de constantes dieléctricas de los revestimientos cerámicos.

La estrategia más apropiada de sellar el revestimiento depende de las condiciones del ambiente de trabajo y de la compatibilidad entre el sellante y el revestimiento. La mayoría de los sellantes orgánicos se limita al uso a baja temperatura.

Tipos de Sellantes

Existen diversos materiales sellantes disponibles en el mercado. En la Tabla 9, se indica una lista de materiales sellantes clasificados de

acuerdo con el mecanismo de formación. Las propiedades requeridas de un sellante incluyen:

- Penetración adecuada.
- Resistencia a productos químicos o solventes.
- Resistencia mecánica en el revestimiento.
- Estabilidad a la temperatura de operación.
- No ser degradante del revestimiento o del metal base.
- No ser tóxico (aplicaciones alimenticias).
- Seguro para ser aplicado.

Tabla 9: Lista de Materiales Sellantes

NO SECABLE	RECOCIDOS
Ceras	Fenólicos recocidos
Aceites	Fenólicos Epóxicos
Grasas	Poliamidas
SECABLES AL AIRE	Resinas epóxicas afinadas
Tintas	Poliésteres
Fenólicos secables al aire	CATALÍTICOS
Fenólicos Epóxicos	Resinas Epóxicas
Vinilos	Poliésteres
Poliésteres	Poliuretano
Resinas de Silicona	OTROS
Carbón molido	Silicato de Sodio
Poliuretano	Etil Silicatos
Aceite de Linaza	Metacrilatos Anaeróbicos

En el caso del eje SAE 1045 metalizado, no se hace uso de ningún tipo de sellante.

3.5 Análisis Metalográfico Post-Metalización

Se obtienen las siguientes gráficas al microscopio luego del proceso de termorociado:

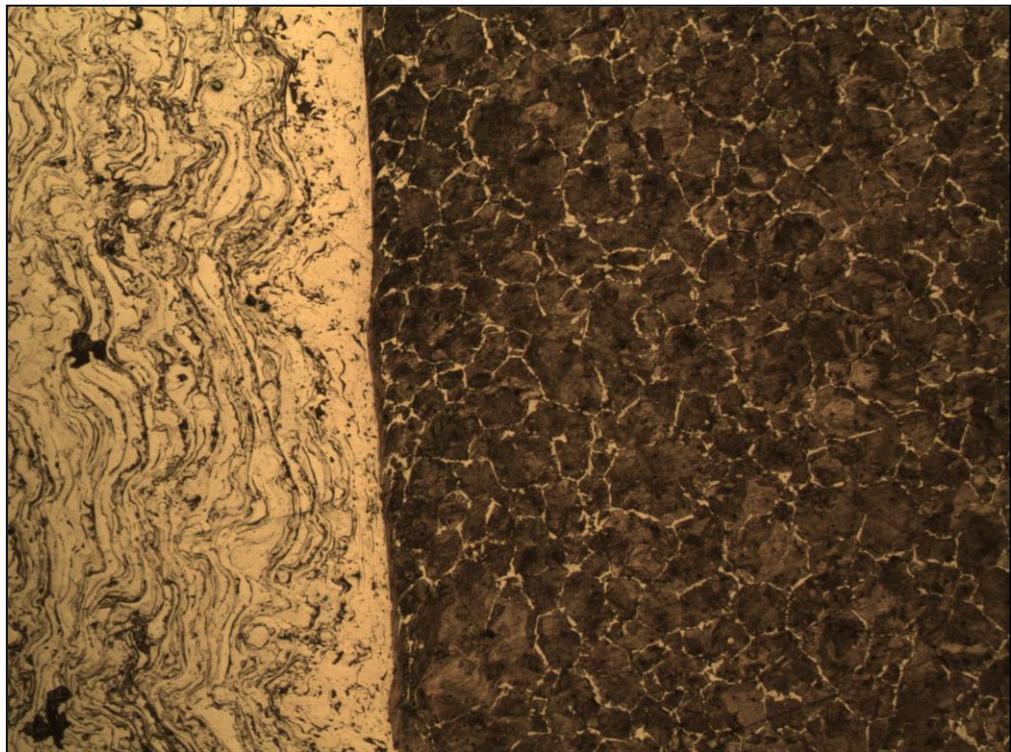


Figura 3.20: Estructura metalográfica a 100x del termorociado

En esta Fig. 3.20, se observa claramente la diferencia de estructuras entre el material base acero SAE 1045 (zona oscura) y el material de aporte (zona clara), aplicado durante el proceso de termorociado.

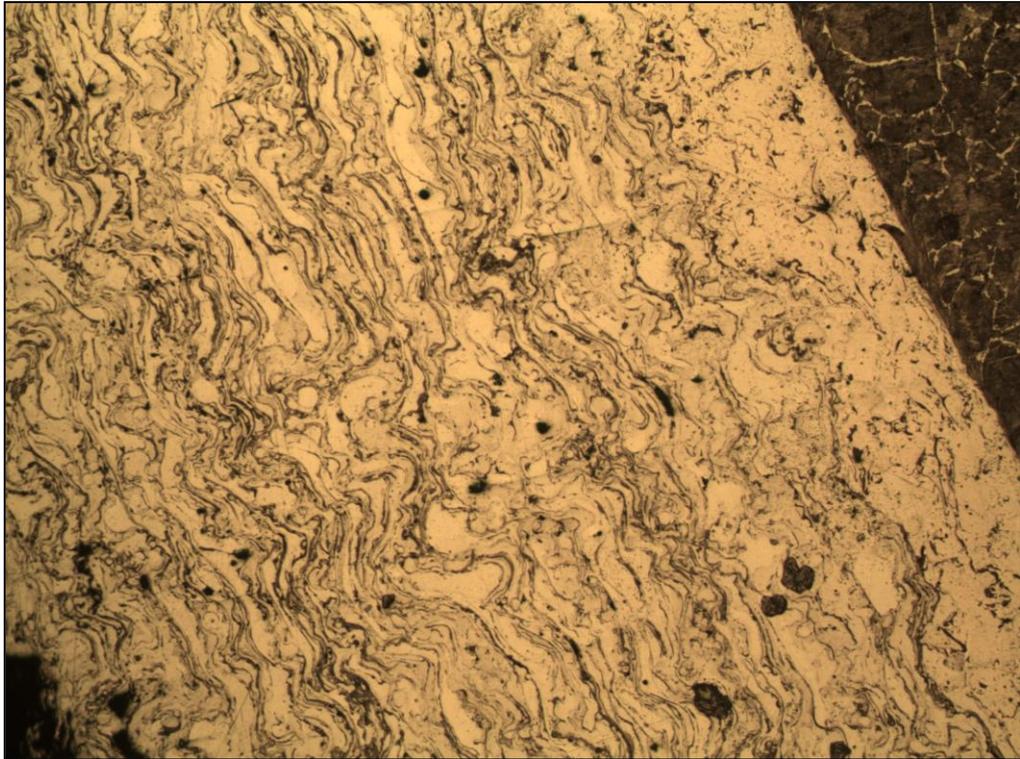


Figura 3.21: Vista a 100x del material rociado

En la Fig. 3.21, se observa la estructura del material rociado. Una muy fina capa de Ni, que se encuentra en el contorno del material base. Y la capa final de Cr al 13%. Se puede observar también, porosidades propias de la aplicación.

3.6 Determinación de las Propiedades Mecánicas Post-Metalización

Ensayo de Dureza Vickers

Del eje rociado y maquinado, se procede a obtener una probeta para su ensayo en el laboratorio.

Se realizan los mismos pasos de preparación de la probeta, como se hizo para el ensayo pre-metalización. El ensayo de dureza se ejecuta en la sección transversal del eje metalizado.

En la Tabla 10 se registran los valores de dureza encontrados durante el ensayo de dureza practicados en el equipo del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica:

Tabla 10: Resultados de ensayo de dureza Post-Metalización aplicado al eje Metalizado

Ensayo	Peso Aplicado (gr)	Dureza Vickers Hv	Dureza Rockwell Rc
1	500	277.3	26.8
2	500	295.1	29.1
3	500	381.9	39.0
4	500	350.2	36.1
5	500	317.5	31.9

Otras Evaluaciones de los Revestimientos Rociados por Arc Spray

Para la obtención de revestimientos de calidad, con el desempeño deseado en servicio, es necesario un control riguroso de las diversas etapas del proceso. Muchas veces, una simple falta de atención en la calibración del equipo es responsable de la mala calidad del revestimiento aplicado. Antes de iniciar un trabajo de rociado térmico, es muy importante saber de las propiedades necesarias del

producto para una determinada aplicación. Aplicaciones más sofisticadas exigen un control mayor de las propiedades y en consecuencia, ese procedimiento tendrá un mayor costo.

Aunque la tecnología de rociado térmico actualmente sea muy utilizada en la industria, las evaluaciones de las propiedades de los revestimientos rociados no son aún totalmente normalizadas. Esto se debe al hecho de que dentro de un mismo revestimiento, las propiedades no son uniformes, pudiendo ocurrir grandes variaciones. Estas variaciones de propiedades están directamente relacionadas al hecho de que los revestimientos poseen características anisotrópicas debido principalmente, a su microestructura laminar, alineada con el plano del sustrato.

Otro factor que también contribuye para esas variaciones en las propiedades, es el hecho de la utilización de materiales diferentes, con diferentes características, en un mismo revestimiento.

Normalmente, la caracterización de la calidad de un revestimiento es la última práctica en la producción. Las propiedades de un revestimiento efectuado por aspersion térmica van a depender directamente de la adhesión entre la capa y el sustrato, así como de la cohesión entre las partículas depositadas. Esas propiedades dependen, de la cantidad de defectos presentes en el revestimiento,

tales como poros, grietas, óxidos, etc. Entre las propiedades usadas para caracterizar revestimientos rociados térmicamente, aparte de las tratadas en este capítulo, como son, el análisis metalográfico y la dureza, las más comunes son:

- 1) Adhesión/Cohesión
- 2) Desgaste

Estas propiedades son normalmente evaluadas a través de diferentes pruebas. Entre ellas, las más usadas son:

A) Ensayos de Adhesión/Cohesión

- Tracción
- Doblamiento
- Cizallamiento

B) Ensayos No Destructivos

Ensayos de Adhesión/Cohesión

Una de las más importantes propiedades de un revestimiento es su resistencia adhesiva (adhesión) y cohesiva (cohesión). La calidad de la adhesión y de la cohesión son requisitos esenciales para el buen desempeño de un revestimiento. De nada sirve tener una capa con espesor ideal y libre de poros si la misma no posee la adherencia

necesaria. Medir la adhesión de un revestimiento es importante por una serie de razones, de entre las cuales se puede citar:

a) Poder verificar la influencia de las variables del proceso o de la preparación del substrato y de este modo, optimizar las condiciones para obtener la resistencia de adhesión requerida.

b) Poder identificar partes del revestimiento que tengan una mayor resistencia adhesiva y partes que sean aceptables. Una prueba ideal para medidas prácticas de adhesión debería tener las siguientes características:

- Ser reproducible
- Ser cuantitativa
- Ser no-destructiva
- Ser fácilmente adaptable para pruebas de rutina
- Tener ejecuciones relativamente simples
- No consumir mucho tiempo
- Ser aplicable para un amplio rango de espesores
- Ser independiente de la experiencia del operador
- Ser aplicable a todas las franjas de adhesivos y adherentes
- Ser válido para una amplia gama de tamaños de muestra
- Ser aplicable para productos y procesos
- Poder medir una amplia gama de resistencias de adhesión

- Estar libre de interpretaciones complejas
- Ser fácilmente patronizado

Actualmente todas las pruebas comúnmente usadas para medir adhesión son destructivas. La mayoría de los ensayos existentes presenta deficiencias que de alguna manera, interfieren en los resultados alcanzados.

Ensayo de Tracción

Numerosas pruebas pueden ser usadas para evaluar la resistencia de adhesión de un revestimiento rociado térmicamente. Actualmente el método más utilizado es la prueba de tracción (Tensile Adhesion Test). Esta prueba es frecuentemente usada como una herramienta para determinar la influencia de las condiciones de aspersion, condiciones de la superficie del sustrato, condiciones del chorro abrasivo, espesor del revestimiento, entre otras, en la calidad del revestimiento.

Las pruebas de tracción normalizadas son relativamente simples de ejecutar y han sido un método ampliamente usado en la industria y laboratorios. Sin embargo, es de extrema importancia tener conocimiento de las deficiencias y controversias que existen en torno a estas pruebas. Debido a la falta de confianza y de la

reproducibilidad para caracterizar tales revestimientos. En la literatura técnica son frecuentemente encontrados resultados de ensayos de tracción sin especificación de la calidad de los materiales y del proceso utilizado. Eso ha conducido, en los últimos años, a un esfuerzo a nivel internacional, para permitir la unificación de la metodología empleada.

Las pruebas de tracción son métodos directos de medición, basados en el traccionamiento vertical del revestimiento. Estas pruebas son las que presentan mayor patronizado, siendo normalizados por cuatro patrones principales: ASTM-C633 (USA), AFNOR-NF LA 91-202-79 (Francia), DIN-50-160-A-81 (Alemania) y JIS-H8666-80 (Japón). Las configuraciones de estas pruebas son esencialmente las mismas; sin embargo, el proyecto y dimensiones de los cuerpos de prueba, así como los espesores del revestimiento que son probados, son diferentes, lo que acaba dificultando la comparación de los resultados entre una prueba y otra.

En la Fig. 3.22, se muestra la configuración de la prueba de la ASTM-C633, las otras normas tienen básicamente la misma configuración; sin embargo, las dimensiones del substrato varían de 25.4 a 40 mm de diámetro. Esta diferencia en el diámetro del substrato resulta en una variación de la tensión cerca al eje de

tensión de la barra de tracción, es decir, la distribución de la tensión en las vecindades de la barra de tensionado no es uniforme; de esta forma los valores de adhesión y sus variaciones pueden ser diferentes para un mismo revestimiento. Otras diferencias entre las normas se refieren al tamaño, forma y material del sustrato.

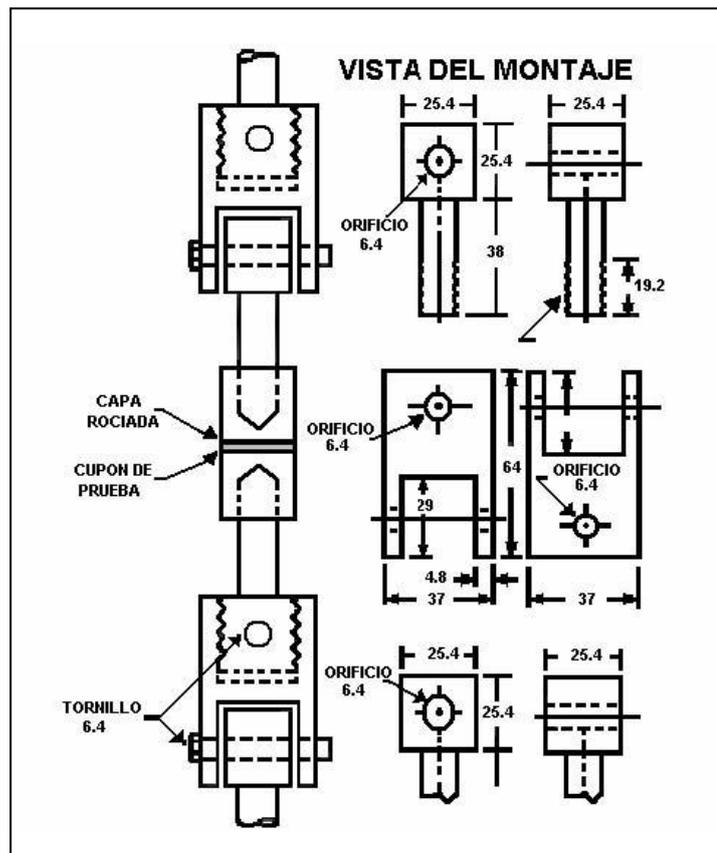


Figura 3.22: Dispositivo para ensayo de tracción de acuerdo a la Norma ASTM-C633 (medidas en mm)

La geometría de los cuerpos de prueba, definida por las normas, limita la aplicación de la prueba, cuando hoy en día, están siendo rociadas térmicamente geometrías más complejas, donde el patrón

normalizado de la prueba no tiene como ser aplicado. Como la tecnología de aspersión térmica ha cubierto cada vez más campos de aplicación, inclusive cerámicos y materiales de forma complejas, algunas modificaciones necesitan ser hechas para habilitar pruebas de adhesión a esos substratos. Otro factor problemático en las pruebas de adhesión normalizadas es que estas son limitadas por la resistencia adhesiva del ligante (adhesivo).

Entre las pruebas de resistencia adhesiva existentes, una de las más utilizadas es la norma ASTM-C633. Su bajo costo y practicidad justifican su gran utilización. Conforme a esta norma, los cuerpos de prueba utilizados como substrato son cilíndricos con diámetro de 25 mm y 25 mm de longitud. El ensayo, de acuerdo con la norma, prevé la unión del cuerpo de prueba revestido con una contraparte, de mismas dimensiones en acero SAE 1020.

Para la unión, es utilizado un adhesivo con base epóxica. Después de la cura del adhesivo, el conjunto montado es tensionado hasta que ocurra la separación. Después de la ruptura, la carga máxima registrada debe ser dividida por el área de la sección transversal del cuerpo de prueba, para definir la resistencia adhesiva-cohesiva del revestimiento. Según la norma, la capa a ser ensayada debe tener un espesor por encima de 380 μm . Esta limitación es impuesta

debido al adhesivo, que puede infiltrarse en el revestimiento y este efecto, en capas más finas, puede interferir, de manera significativa, en los resultados. Cualquier desvío puede llevar a la obtención de resultados incorrectos, debido a la aplicación diferenciada de la carga en el área de la sección transversal del revestimiento. Durante la preparación y ejecución de los ensayos, todas las recomendaciones y exigencias de las normas deben ser cumplidas, aspecto de gran importancia para garantizar la validez de los resultados.

A través de las pruebas de tracción, es posible evaluarse la resistencia adhesiva/cohesiva del revestimiento. Si hay la necesidad, a través de esta prueba de hacer un análisis más profundo de los cuerpos de prueba ensayado y verificar detalladamente el punto de la fractura o rotura del revestimiento. Para el análisis de la región fracturada, inmediatamente después de la ruptura, los cuerpos de prueba y la contrapieza de acero deben ser cuidadosamente acondicionadas para que no ocurran daños en la superficie, lo que puede enmascarar los resultados del análisis. En las pruebas de adherencia por tracción con el uso de adhesivos, pueden ocurrir tres tipos de fractura, que son clasificadas en función del lugar predominante de ruptura, como: adhesiva (interfase revestimiento/substrato), cohesiva (interior al revestimiento),

adhesivo (cualquier posición en el interior del adhesivo o en sus interfases).

En la Fig. 3.23 se muestra de manera esquemática los tipos de fractura resultantes de la prueba de adhesión.

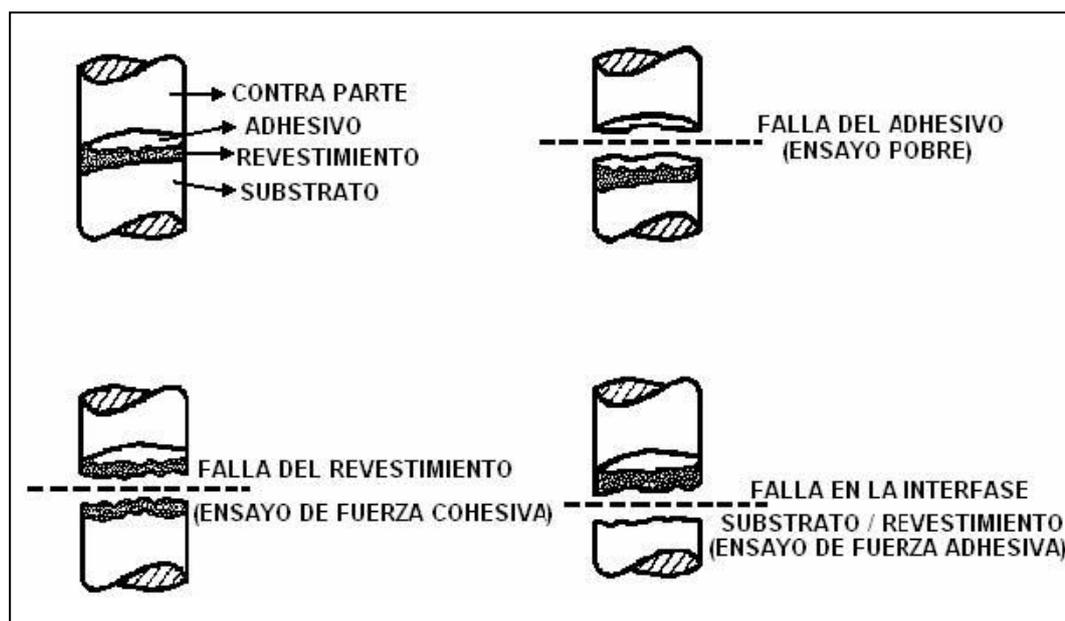


Figura 3.23: Tipos de fracturas resultantes de la prueba de adhesión

Si la fractura ocurre en el interior del adhesivo utilizado en la prueba o en sus interfases, la referida prueba es considerada sin validez objetiva, debido a que la adhesión del revestimiento es superior al valor obtenido. Como los cuerpos de prueba pueden presentar diferentes tipos de fractura, inclusive fractura de tipo mixto, es necesario verificar detalladamente el tipo de falla para cada tipo de ensayo, pudiéndose, entonces, evaluar la influencia específica de los

diversos parámetros, tanto del proceso, como de preparación. Las principales causas de falla de sistemas de revestimientos avanzados es la falla por adhesión. Aún en los sistemas muy bien desarrollados, como en los revestimientos duros en herramientas de acero, el tipo de falla no es generalmente, por desgaste, pero sí falla por adhesión. Para la evaluación de la adhesión de un revestimiento y la comparación entre resultados obtenidos por diferentes procesos, para diferentes materiales y condiciones de aplicación, es necesario que sean utilizados referencias patronizadas y normalizadas, minimizando la influencia de factores aleatorios.

Ensayo por Doblado

La prueba de doblado se encuentra en la clase de pruebas destructivas realizadas en laboratorio. Esta prueba consiste en el doblamiento del cuerpo de prueba. Para realizarse la prueba de doblamiento, deben ser fabricadas muestras con el mismo material y con las mismas condiciones de aspersión. La aparición de grietas o desprendimiento del revestimiento suministra un valor relativo de la ductilidad, permitiendo la comparación de materiales y procesos de deposición. Las superficies probadas pueden ser analizadas, tanto a ojo, como con la utilización de una lupa con aumentos de hasta 10 veces. Durante el doblado, no debe ocurrir delaminación,

descascamiento o grietas groseras. En la región del doblado son aceptables grietas finas del revestimiento. Las normas MIL-STD-2138A y Petrobrás N-2568 traen procedimientos específicos para el ensayo de doblado. En la Fig. 3.24, se ilustra, esquemáticamente, resultados aceptables y no aceptables de la prueba de doblado, de acuerdo con la norma MIL-STD-2138A.

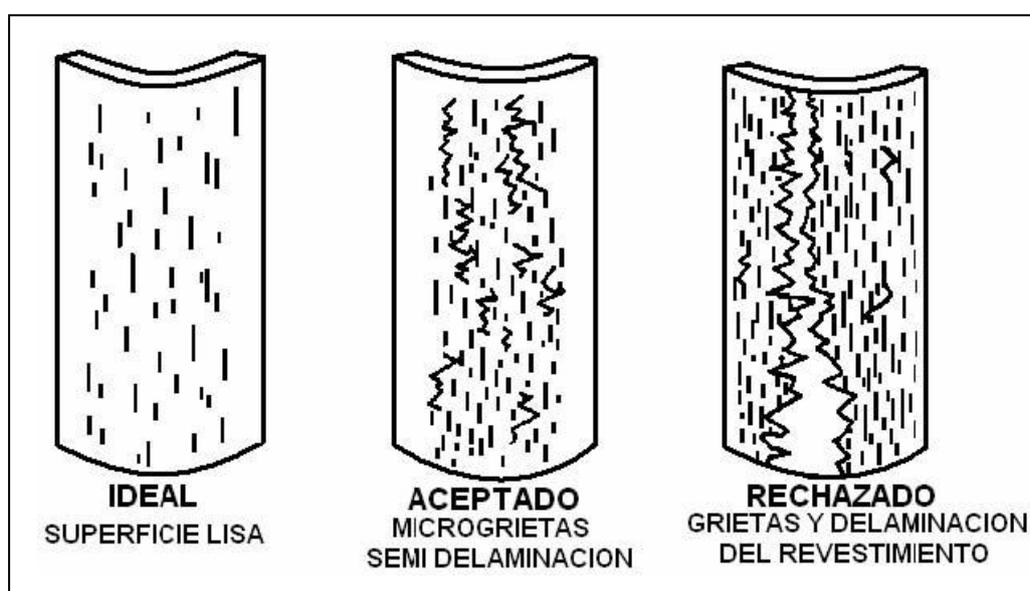


Figura 3.24: Resultados de la Prueba de Doblado

Ensayo de Cizallamiento

Existen varias pruebas destructivas, no normalizadas, para evaluar la adherencia del revestimiento por su resistencia al cizallamiento. Estas pruebas se diferencian en cuanto, a las múltiples maneras de generar tensiones tangenciales en la superficie de unión del

revestimiento/substrato. Las pruebas de cizallamiento no presentan la limitación de la resistencia del adhesivo, sin embargo tiene un factor limitante que es el espesor del revestimiento, que por razones de posicionamiento debe tener, como mínimo, 70 μm . La principal restricción es que permite sólo una evaluación cualitativa y comparativa de la adherencia y la cohesión.

Ensayos No Destructivos

La evaluación del revestimiento por ensayos no destructivos es principalmente usada para medidas de espesores, rugosidad superficial y apariencia visual. Procedimientos bien establecidos usan calibradores, micrómetros, medidores de peso y espesor, medidores de perfil, microscopios y estereoscopios y líquido penetrante. Ensayos no destructivos utilizan técnicas más sofisticadas para la determinación de las propiedades de un revestimiento, pero aún están en desarrollo. Muchas de estas pruebas están siendo usadas sólo en laboratorios y eventualmente, tendrán un papel importante en la aplicación de nuevas tecnologías de evaluación. Muchas de las técnicas emergentes de ensayos no destructivos para evaluar la calidad de los revestimientos son basadas en métodos y resultados sofisticados, los cuales son de

difícil interpretación. Estos métodos incluyen ultra sonido, emisión acústica, imagen térmica, medidas dieléctricas, flujo magnético, etc.

En la práctica, el control diario de calidad es usualmente hecho usando la prueba de microscopía óptica de muestras de revestimientos rociados térmicamente, simultáneamente con el producto revestido. Sin embargo, productos de formas más complejas, que las muestras preparadas para que sean analizadas por microscopía óptica, son producidos y esto resulta en superficies de diferentes calidades, de diferentes tensiones residuales generadas durante la aspersion. Así, el revestimiento efectivo puede contener defectos que no son detectados, ni visualmente, ni con auxilio del microscopio. Por lo tanto, técnicas de ensayos no destructivos han sido desarrolladas para satisfacer esta demanda. Los métodos de ensayos no destructivos deben permitir la detección de los siguientes macro defectos, que pueden resultar en subsecuente delaminación del revestimiento en servicio:

- Mal contacto del revestimiento con el sustrato
- Grietas verticales
- Grietas planas
- Macroporosidades

Su resolución debe ser de décimos de micrones. Aún, para que sean aceptados en condiciones industriales, los métodos deben:

- Ser de fácil aplicación para grandes superficies
- Fácil interpretación de los resultados de las pruebas
- Tener bajo costo

Actualmente, solamente los métodos acústicos y térmicos parecen satisfacer algunas de estas expectativas. Estos métodos probaron también, ser útiles en las prácticas de investigación y desarrollo y en la optimización de los parámetros del proceso.

Ensayo por Ultrasonido

El principio de la prueba se basa en la transmisión de la onda ultrasónica a través del revestimiento y produce una reflexión en el límite del revestimiento y del metal del substrato. La onda viaja a través del revestimiento y produce una segunda reflexión en la superficie del revestimiento. El intervalo de tiempo entre las reflexiones es medido para determinar las propiedades del revestimiento.

En la Fig. 3.25 se muestra de manera esquemática, la técnica para medidas por ultrasonido.

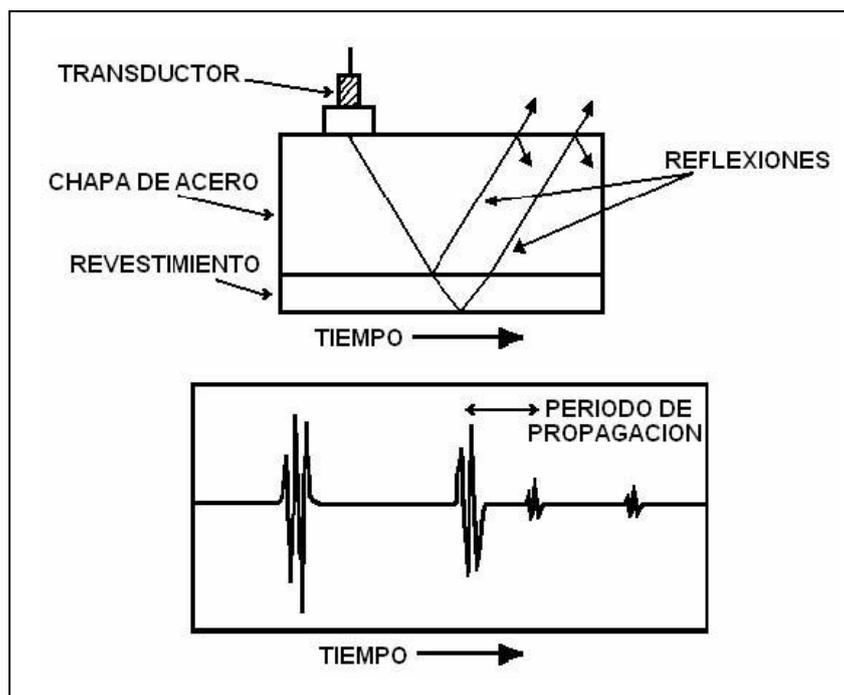


Figura 3.25: Técnica usada para medidas de ultrasonido

Las investigaciones muestran que existe una relación bien definida entre la velocidad de propagación de una onda ultra sónica y las propiedades de un revestimiento rociado térmicamente. Básicamente, cuando la densidad y la microdureza de un revestimiento aumentan, la velocidad ultra sónica también aumenta y cuando la porosidad aumenta, la velocidad de propagación de la onda ultra sónica disminuye. Sin embargo, la literatura técnica disponible se limita a comentar el uso de esta técnica a nivel experimental en laboratorios.

3.7 Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos tanto con el análisis metalográfico, como con el ensayo de dureza, se resumen en los siguientes puntos:

- 1) Las propiedades del material base se mantienen, la aplicación de la metalización en el eje, no alteró las propiedades físicas de éste.
- 2) El material de aporte rociado, mejoró las propiedades mecánicas del eje (la dureza superficial se incrementó).
- 3) De acuerdo al análisis metalográfico, la liga mecánica entre el eje y el material de aporte está de acuerdo a los requerimientos, con bajo porcentaje de poros e incrustaciones.
- 4) El eje metalizado, luego del maquinado en el torno está 100% operativo.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1) La metalización no provocó cambios en la microestructura del acero SAE 1045, de acuerdo al análisis metalográfico realizado antes y después del metalizado.

2) La microestructura generada en la capa superficial de la sección transversal del eje registra una configuración similar a la del acero inoxidable al 13% de Cr y 1% Ni. Si bien se observan porosidades en la capa metalizada, su porcentaje es bajo, alrededor del 5% aproximadamente, y no influye en la resistencia cohesiva entre capas del metalizado.

3) La metalización del eje generó un aumento en la micro-dureza de su superficie. Se registra un incremento de alrededor del 40%, de acuerdo a los ensayos registrados antes y después del metalizado.

4) La metalización es un proceso que a pesar de su costo inicial, sin embargo, por todas sus ventajas ya descritas en el desarrollo de este trabajo, es el proceso más recomendado. Ya que no solo se recupera la pieza en mal estado, sino que aumenta la vida útil de la misma, con la selección correcta de los materiales de aporte.

Recomendaciones

1) Previo a seleccionar el proceso de metalización como método para recuperar o proteger una pieza o elemento mecánico, es necesario previamente, hacer un estudio de sus condiciones de operación, tipos de desgaste al que está sometido, vida útil precedente, costo de la pieza nueva, importancia de la pieza en el proceso. Conocidos estos datos, se debe determinar el área y peso de los alambres a aplicar, así como, su tipo y diámetro. Realizado el análisis de costos, podemos aplicar o no el proceso de metalización.

2) Se recomienda que el eje metalizado no deba ser sometido a impacto severo, debido a que la unión entre el material base y el

material de aporte ocurre, ya sea por interacción metalúrgica y zonas de difusión o por ambos, y por esto razón es propenso a que el material metalizado se desprenda.

3) Para futuras aplicaciones se recomienda automatizar el proceso, montando la pistola sobre el porta herramienta del torno, de esta manera se pueden controlar eficientemente todos los parámetros involucrados en el proceso y efectuar una aplicación en el menor tiempo posible.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) APLICATION DATA BULLETIN, File: 2.1.1.1, Issue: K10330, Supersedes: H10219, Tafa Incorporated, Concord, N.H. USA, 1992.
- 2) Tafa Technical Data, 146 Pembroke Road – Concord N.H. USA 03301, 1992.
- 3) JOSÉ MARULANDA, Rociado Térmico, Publicación en Internet, 2004.
- 4) SIDNEY H. AVNER, Introducción a la Metalurgia Física, McGraw Hill, Ediciones del Castillo S.A. Madrid 1966.
- 5) ROBERT F. MEHL, ASM Handbook Comitee, Metals Handbook, Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, 8th Edition Vol. 7, Ohio 44073.
- 6) WIRE BROCHURE, Wire Solutions Catalog, PRAXAIR Surface Technologies Inc, 1955 Main Street – Indianapolis, IN 46224 USA, 2001.

APENDICE A

NOMBRE, CARACTERISTICAS, PROPIEDADES Y APLICACIONES DE ALAMBRES PARA TERMOROCIADO TAFE

Nombre del Alambre	Material	Diámetro	Cobertura (/pie ² /0.001") (m ² /100µm)	Rata de Deposición (/hr/100A)	Aplicaciones
Al-1800	Níquel Aluminio Molibdeno	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Liga base • Resistencia a la Abrasión, Impacto y Oxidación
AlCro	Aceros al Cromo Aluminio	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Bueno para Multipases • Excelente resistencia al desgaste
01A	Aluminio 12% Silicio	1/16" (1.6 mm)	0.3 oz 0.3 kg	6 lb 2.8 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Restaurar dimensiones • Aprobado en Aeronáutica
01P	Aluminio 1100	1/8" (3.2 mm)	0.3 oz 0.3 kg	6 lb 2.8 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión
01S	Aluminio 6% Silicón	1/16" (1.6 mm)	0.3 oz 0.3 kg	6 lb 2.8 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Restaurar dimensiones • Aprobado en Aeronáutica
01T	Aluminio	1/16" (1.6 mm) 1/8" (3.2 mm)	0.3 oz 0.3 kg	6 lb 2.8 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión • Conductividad Eléctrica • Aprobado en Aeronáutica
02A	Zinc Aluminio	2 mm 1/8" (3.2 mm) 3/16" (4.8 mm)	0.8 oz 1.0 kg	21 lb 9.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión

Nombre del Alambre	Material	Diámetro	Cobertura (/pie ² /0.001") (m ² /100µm)	Rata de Deposición (/hr/100A)	Aplicaciones
02T	Estaño Zinc	2 mm	0.9 oz 1.1 kg	45 lb 20.4 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitores:
02W	Estaño puro	2 mm	0.9 oz 1.1 kg	50 lb 22.7 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Contactos Eléctricos
02 Z	Zinc	1/16" (1.6 mm) 2 mm 1/8" (3.2 mm) 3/16" (4.8 mm)	0.9 oz 1.1 kg	21 lb 9.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión • Conductividad Eléctrica
04T	Babbit	1/16" (1.6 mm) 2 mm 1/8" (3.2 mm)	0.9 oz 1.1 kg	50 lb 22.7 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración de Rodamientos, Chumaceras • Capacitores
05T	Cobre	1/16" (1.6 mm) 1/8" (3.2 mm)	0.9 oz 1.1 kg	11 lb 5.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad Eléctrica • Restauración de Cobre • Revestimiento decorativo
06C	Níquel Cromo	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	11 lb 5.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la Oxidación • Aprobado en Aeronáutica
06T	Níquel	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión a alta Temperatura
10T	Bronce Aluminio	1/16" (1.6 mm) 1/8" (3.2 mm)	0.9 oz 1.1 kg	9 lb 4.1 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Liga Base • Restauración • Cavitación • Aprobado en Aeronáutica

Nombre del Alambre	Material	Diámetro	Cobertura (/pie ² /0.001") (m ² /100µm)	Rata de Deposición (/hr/100A)	Aplicaciones
11T	Bronce Aluminio Níquel	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	9 lb 4.1 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Cavitación • Restauración de pistas de deslizamiento • Protección contra la Corrosión
12T	Latón	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	9 lb 4.1 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Uso donde se requiere de Bronce Tobin • Propulsores de Bomba • Bronce fundido
13T	Molibdeno	1/16" (1.6 mm) 1/8" (3.2 mm)	1.1 oz 1.3 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al rayado • Aprobado en Aeronáutica
14T	Titanio	1/16" (1.6 mm)	0.4 oz 0.5 kg	3 lb 1.4 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Implantes Médicos
16T	Bronce Silicio	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	9 lb 4.1 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Reparación Cosméticos • Recubrimiento decorativo • Aprobado en Automovilismo
30S	Cobre Plata Zinc	1/16" (1.6 mm)	1.0 oz 1.2 kg	12 lb 5.4 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Sellos estacionarios de motores aeronáuticos • Características al desgaste por rozamiento
30T	Acero de bajo Carbono	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración dimensional de partes gastadas.....
38T	Acero de alto Carbono 0.8% C	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración • Resistencia al desgaste y a la erosión de ventiladores.....
39T	Acero de alto Carbono 1.0% C	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente resistencia al desgaste • Más duro que el 38 T
45CT	Níquel Cromo Titanio	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	11 lb 5.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra alta temperatura....

Nombre del Alambre	Material	Diámetro	Cobertura (/pie ² /0.001") (m ² /100µm)	Rata de Deposición (/hr/100A)	Aplicaciones
55T	Acero Inoxidable 18/5	1/16" (1.6 mm) 1/8" (3.2 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo Carbono • Baja Contracción • Excelente maquinabilidad • Aprobado en Aeronáutica
58T	Cobre Níquel Indium	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 10 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia • Recubrimiento de baja densidad • Aprobado en Aeronáutica
60T	Acero Inoxidable Serie 420	1/16" (1.6 mm) 1/8" (3.2 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración • Bajo • Excelente resistencia al desgaste • Aprobado en Aeronáutica
61T	Acero Inoxidable Serie 430	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Ligeramente más maquinable y mejor resistente a la corrosión que el 60T
70T	Níquel Cobre	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión Marina • Rodillos de impresión
71T	Níquel Cromo Molibdeno	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	11 lb 5.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección..... • Papel.....
75B	Bond Arc Níquel Aluminio 5%	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Liga Base • Aprobado en Aeronáutica • Resistencia a la abrasión y oxidación a altas temperaturas
77T	Níquel Cromo Molibdeno	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	11 lb 5.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a ácidos y gases calientes

Nombre del Alambre	Material	Diámetro	Cobertura (/pie ² /0.001") (m ² /100µm)	Rata de Deposición (/hr/100A)	Aplicaciones
78T	Níquel Cromo Molibdeno	1/16" (1.6 mm)	0.8 lb 1.0 kg	11 lb 5.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración dimensional de Motores Aeronáuticos • Resistencia a la corrosión de ácidos y gases a altas temperaturas
79B	Níquel 20% Aluminio	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la abrasión y oxidación a alta temperatura • Aprobado en Aeronáutica
80T	Acero Inoxidable 18/8	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión • Restaurar dimensiones • Rodillos de impresión
85T	Acero Inoxidable Serie 316	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	10 lb 4.5 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión • Restaurar dimensiones
88T	Acero Inoxidable Serie 300	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	9.5 lb 4.3 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la Corrosión • Restaurar dimensiones • Rodillos de impresión
204M	Aleación de Plomo	1/16" (1.6 mm) 2 mm	0.8 oz 1.0 kg	22 lb 10 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Usado para crear superficies metálicas para labrado de moldes
35 MXC	Aleación de alto Carbono	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	8.5 lb 3.9 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Recubrimiento para tracción, arrastre y antideslizante • Resistencia al desgaste
37 MXC	Aceros al Cromo	1/16" (1.6 mm)	1.0 oz 1.2 kg	8 lb 3.6 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Alta dureza • Excelente resistencia al desgaste
73 MXC	Níquel Cromo Aluminio	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	8.5 lb 3.9 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la Oxidación y Corrosión • Aprobado en la Aeronáutica

Nombre del Alambre	Material	Diámetro	Cobertura (/pie²/0.001") (m²/100□m)	Rata de Deposición (/hr/100A)	Aplicaciones
74 MXC	Níquel Aluminio Molibdeno	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	8.5 lb 3.9 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Media dureza para aplicaciones en desgaste de rodamientos..... • Resistencia a la erosión de partículas • Aprobado en Aeronáutica
76 MXC	Níquel Cromo Aluminio Ytrium	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	7 lb 3.2 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Liga Base para Cerámicas • Resistencia a la oxidación a alta temperatura • Aprobado en Aeronáutica
90 MXC	Acero al Níquel Cromo	1/16" (1.6 mm)	1.0 oz 1.2 kg	7 lb 3.2 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra el desgaste y corrosión
95 MXC	Acero al Cromo Boro	1/16" (1.6 mm)	1.0 oz 1.2 kg	8 lb 3.6 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra el desgaste y corrosión • ID Ventiladores • Tubos de Caldera
96 MXC	Acero al Níquel Cromo	1/16" (1.6 mm)	1.0 oz 1.2 kg	7.5 lb 3.4 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra la corrosión a alta temperatura • Resistencia a la Abrasión
97 MXC	Acero al Níquel Cromo con Carbuos de Tungsteno	1/16" (1.6 mm)	1.0 oz 1.2 kg	6.5 lb 3.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al desgaste y a la abrasión
98 MXC	Acero al Níquel Cromo	1/16" (1.6 mm)	1.0 oz 1.2 kg	8 lb 3.6 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra el desgaste y la corrosión
106 MXC	Cobalto Níquel Cromo Tungsteno	1/16" (1.6 mm)	0.9 oz 1.1 kg	6.5 lb 3.0 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la abrasión y fretting en altas temperaturas de medio ambiente

Nombre del Alambre	Material	Diámetro	Cobertura (/pie ² /0.001") (m ² /100□m)	Rata de Deposición (/hr/100A)	Aplicaciones
444 MXC	Níquel Cromo Aluminio Molibdeno	1/16" (1.6 mm)	0.8 oz 1.0 kg	8.5 lb 3.9 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia contra el desgaste y corrosión • Restauración dimensional en pistas de rodamientos

APÉNDICE B

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ALAMBRES USADOS EN EL TERMOROCIADO DEL EJE

ALAMBRE BASE BondArc 75B

COMPOSICIÓN QUÍMICA	
Níquel (Ni)	95%
Aluminio (Al)	5%
PROPIEDADES FÍSICAS	
Tamaño del Alambre	1/16 plg (1.6 mm)
Eficiencia del Depósito	70%
Punto de Fusión	2,642 °F (1,450 °C)
Esfuerzo de Tensión ^a	9,100 psi (62.8 MPa) en superficie limpia 9,750 psi (67.2 MPa) en superficie sandblasteada
Textura del recubrimiento	Variable ^b
Dureza	55-80 Rb
Densidad del recubrimiento	7.8 gr/cm ³ ^c
Peso del recubrimiento	0.038 lbs/ft ² /mil
Propiedades Magnéticas	No magnéticas
Resistencia a la Abrasión	Buena
Resistencia al Impacto	Excelente
Coefficiente de Expansión Térmica	7x10 ⁻⁸ plg/plg°F (1,000 °F)
Resistividad Eléctrica	200 μ Ω cm
Resistencia al Calor	Buena ^d

PARÁMETROS DE ROCIADO	
Rango de Rociado	10 lbs/hr/100Amp (4.5 Kg/hr/100Amp)
Cubrimiento	0.9 oz/pie ² /0.001 plg (1.10 Kg/m/100μm)
Patrón de Rociado ^e	Cross Nozzle/Positioner – 1 plg (2.5 cm) Slot Nozzle/Positioner – 2 plg (5 cm)
Longitud de Alambre por libra	84 pie de 1/16 plg

- a Valores son para sustrato de acero ASTM C633-69. Para esfuerzos de liga en otros materiales sustratos, ver Apéndice C.
- b Condiciones: 6 plg de standoff, 40 psi – 8830 , depende del nozzle cap, aire presurizado – alto psi.
- c Densidad depende de la presión de aire – 80%. 90% para reconstrucción.
- d No evidente aleación/sustrato:
5 días @ 1,000 °F
3 días @ 1,800 °F
15 minutos @ 2,200 °F
- e La más alta presión, tamaño de alambre (1/16 plg), y más bajo amperaje con nozzle cap rojo proporciona el más pequeño patrón de.

**ALAMBRE FINAL
ACERO INOXIDABLE AL 13% DE CROMO 60T**

COMPOSICIÓN QUÍMICA	
Carbón	0.3
Fósforo	Trace
Sulfuro	Trace
Manganeso	1.0
Níquel	1.0
Cromo	12/14
Silicio	0.08
Hierro	Balance
PROPIEDADES FÍSICAS	
Tamaño del Alambre	1/16 plg (1.6 mm)
Eficiencia del Depósito	78 %*
Punto de Fusión	2,600 °F (1,427 °C)
Esfuerzo de Tensión	4,730 psi (32.6 MPa)
Textura del Revestimiento	Variable**
Textura del Acabado	6-15 µplg aa**
Dureza	R _c 40-43
Densidad del Revestimiento	6.74 g/cm ³ **
Peso del Revestimiento	0.035 lb/plg ² /mil
	0.0018 plg/plg (cm/cm)
Coefficiente de Expansión Térmica	6.6 x 10 ⁻⁷ plg/plg °F (1,000 °F)

PARÁMETROS DEL ROCIADO	
Rango de Rociado	10 lb/hr/100 Amp (4.5 Kg/hr/100 Amp)
Cubrimiento	0.8 oz/pie ² /0.001plg (0.98 kg/m ² /100 μm)
Patrón de Rociado ****	Cross Nozzle/Positioner – 1 plg (2.5 cm) Slot Nozzle/Positioner – 2 plg (5 cm)
Longitud de Alambre por libra	96 pie (1/16 plg)

* Depende de la presión de aire, standoff, nozzle cap y tamaño de target.

** Condiciones: 6 plg de standoff, 40 psi – 8830, depende de la presión de aire – fino.

*** Para incrementar la dureza, la presión de aire debe estar sobre los 60 psi.

**** Presiones más altas, diámetro más pequeño de alambre (1/16 plg), y más bajo amperaje con nozzle cap rojo.

APÉNDICE C

RENDIMIENTO NOMINAL DE DEPÓSITO DE ALAMBRE PARA PROCESO ARC SPRAY Tafa

	lbs/hr/100 A
Aluminio (01 S)	6
Bronce Aluminio (10 T)	9
Babbit (04 T)	50
Bond Arc (75 B)	10
Bronce	11
Cobre (05 T)	11
Níquel-Cobre (70 T)	11
Níquel (06 T)	10
Aluminio Silicio (01 A)	6
Acero Inoxidable (55 T)	10
Acero de bajo carbono (30 T)	10
Estaño Zinc (02 T)	45
Zinc (02 Z)	24

APÉNDICE D

PESO DE RECUBRIMIENTO TÍPICO PROCESO ARC SPRAY

MATERIAL	Peso Recubrimiento lb/pie ² /0.001"	Alimentación de Material Requerido		
		Eficiencia del Depósito		
		40%	60%	80%
Aluminio	0.013	0.033	0.022	0.016
Bronce Aluminio	0.033	0.083	0.055	0.042
Alúmina (+ 2% TiO ₂)	0.017	0.043	0.028	0.021
Zirconato de Calcio	0.021	0.053	0.035	0.026
Óxido de Cromo	0.026	0.065	0.043	0.033
Cobre	0.039	0.098	0.065	0.049
Molibdeno	0.046	0.115	0.077	0.058
Níquel	0.039	0.098	0.065	0.049
Níquel/Cromo (80/20)	0.038	0.095	0.063	0.048
Níquel/Cromo (16% Cr)	0.039	0.098	0.065	0.049
Acero Inoxidable (17% Cr/12% Ni)	0.035	0.088	0.058	0.044
Acero al Carbono	0.036	0.090	0.060	0.045
Óxido de Titanio (TiO ₂)	0.021	0.053	0.035	0.026
Tungsteno	0.088	0.220	0.147	0.110
Carburo de Tungsteno (12% Cobalto)	0.064	0.160	0.107	0.080
Carburo de Tungsteno (17% Cobalto)	0.057	0.143	0.095	0.071
Carburo de Tungsteno (46% Ni, 35% Tg/Co, 11% Cr)	0.043	0.108	0.072	0.054
Carburo de Tungsteno (33% Ni, 50% Tg/Co, 9% Cr)	0.048	0.120	0.080	0.060
Zinc	0.039	0.098	0.065	0.049
Óxido de Zirconio	0.028	0.070	0.047	0.035

* Multiplique por (19.20) para convertir a kg/m²/100 micras