

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:

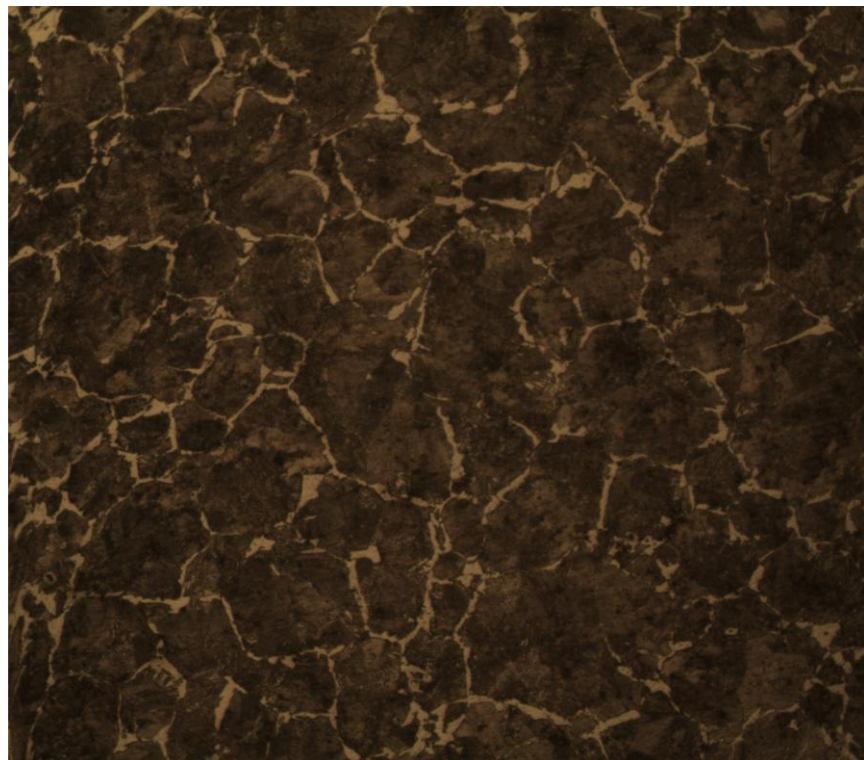


Figura 3.3: Estructura Metalográfica Pre-Metalización de la sección transversal del eje a 200x



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.

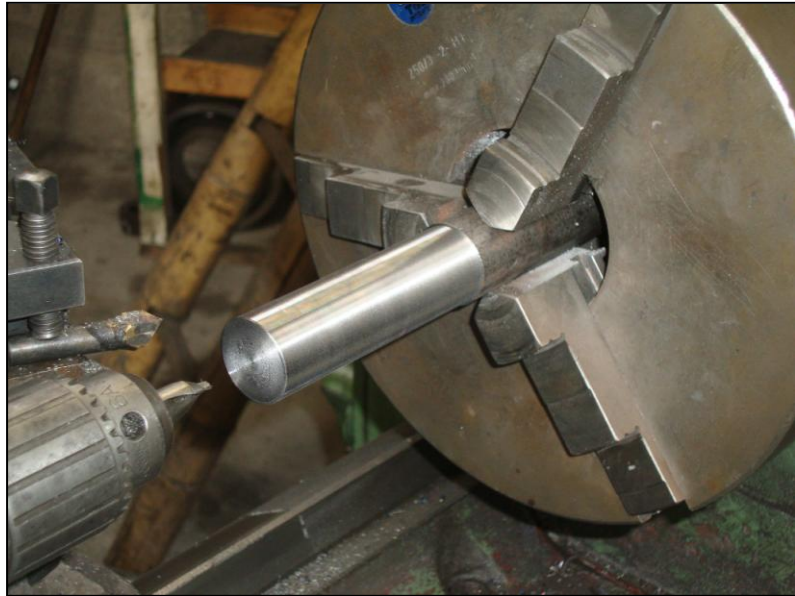


Figura 3.7: Estado del eje después del mecanizado

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.

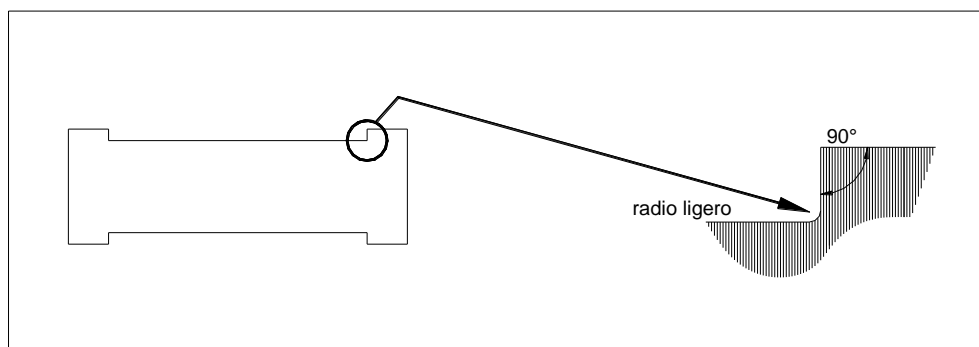


Figura 3.8: Pre-maquinado usado en el eje a rociar

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° .

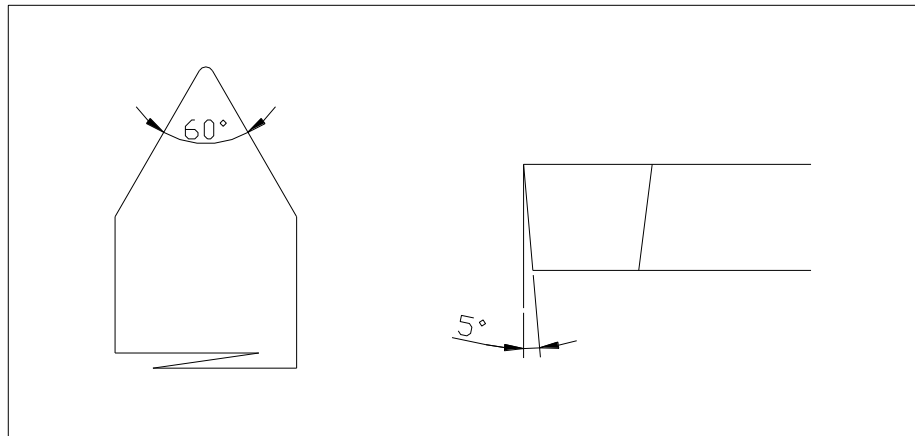


Figura 3.9: Cuchilla a usar para el roscado del eje

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.

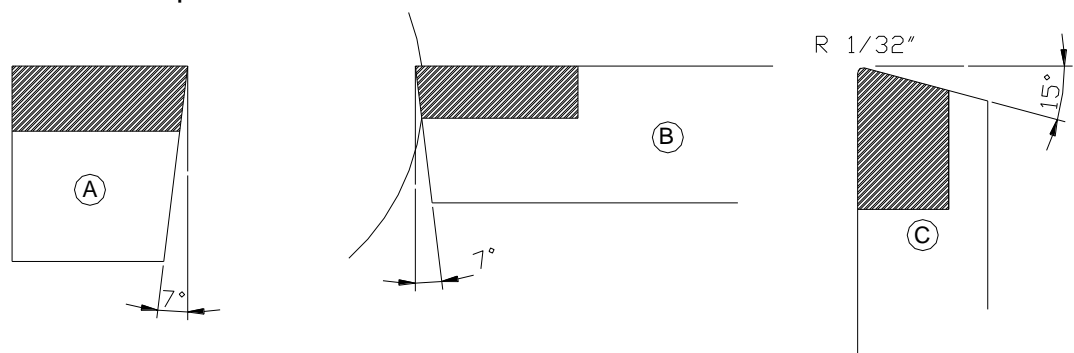


Figura 3.18: Forma de Cuchilla de Torno recomendada para el maquinado

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:

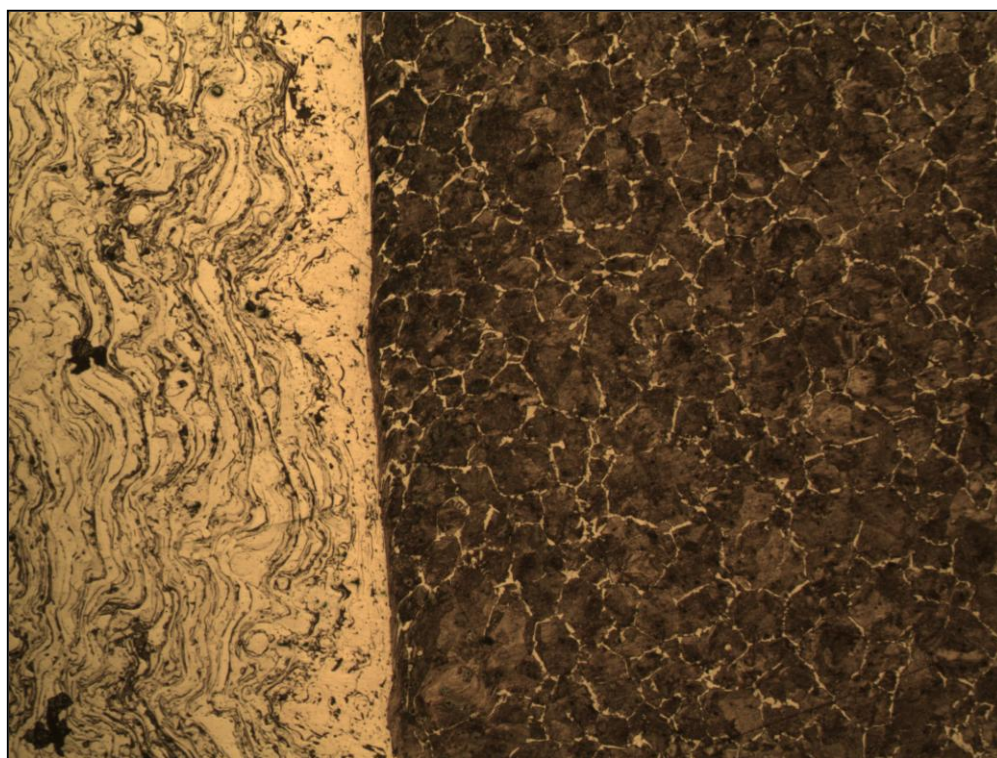


Figura 3.20: Estructura metalográfica a 100x del termorociado

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.

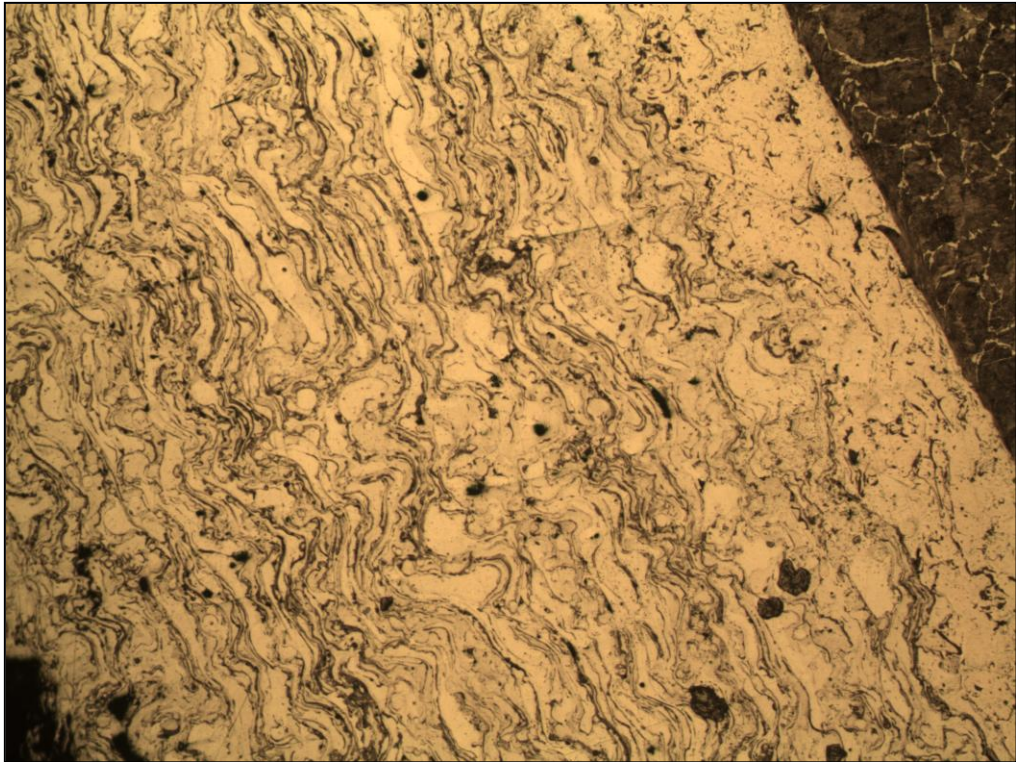


Figura 3.21: Vista a 100x del material rociado

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 aspersión, 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.

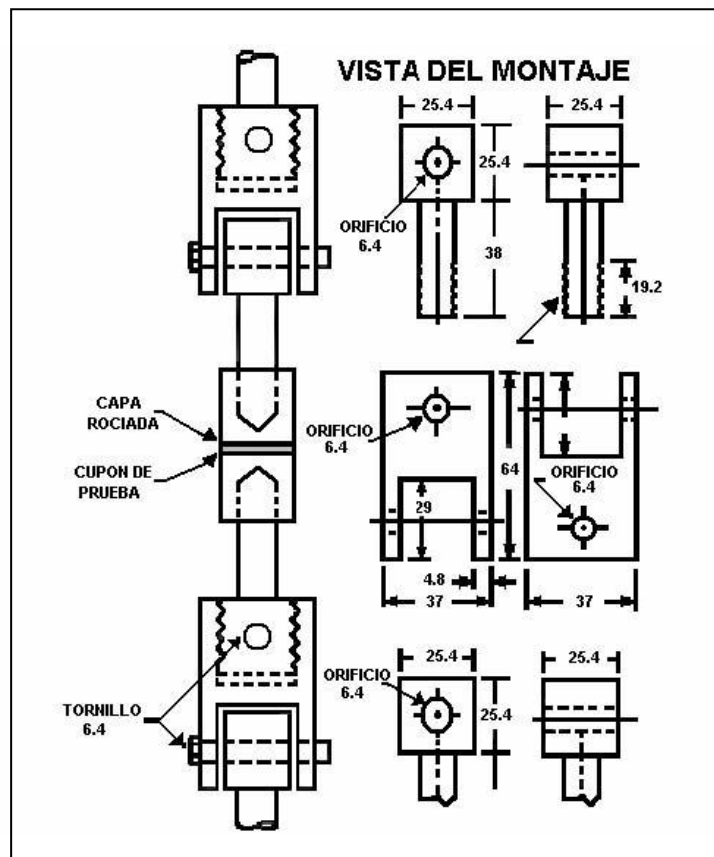


Figura 3.22: Dispositivo para ensayo de tracción de acuerdo a la Norma ASTM-C633 (medidas en mm)

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.

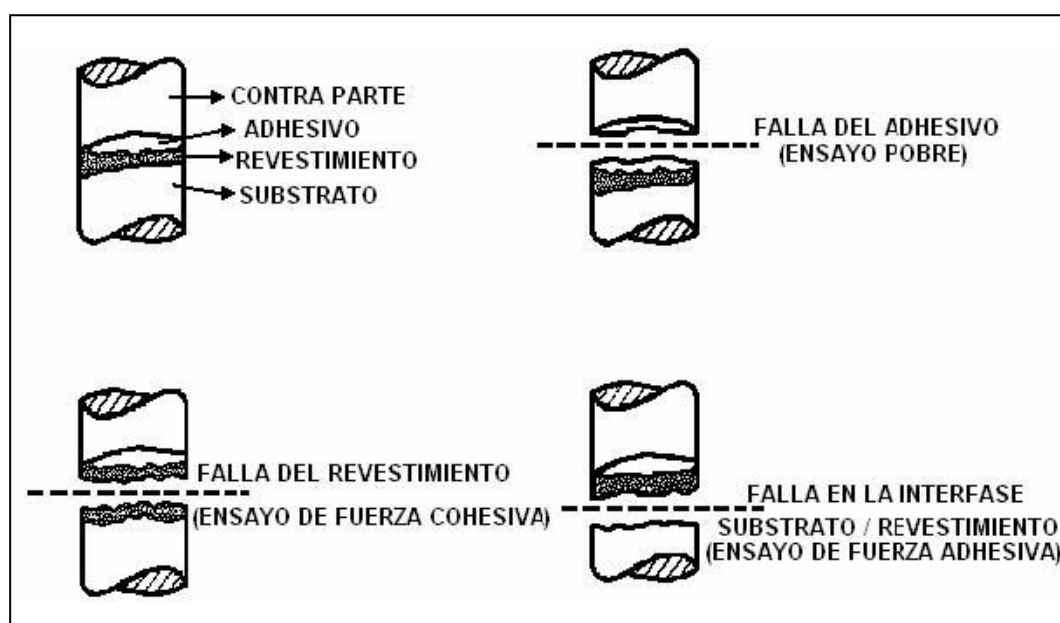


Figura 3.23: Tipos de fracturas resultantes de la prueba de adhesión

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.

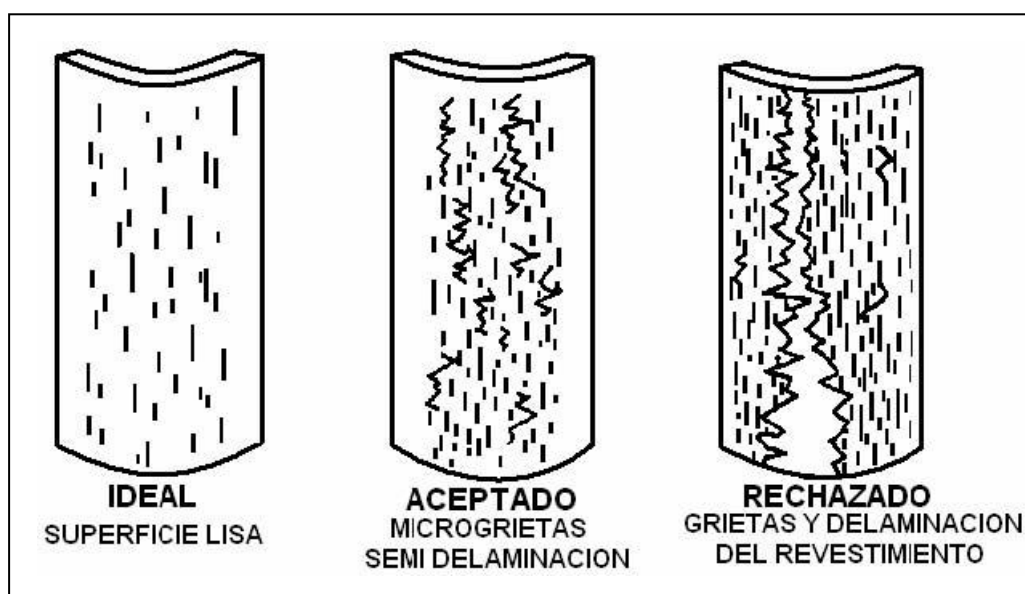


Figura 3.24: Resultados de la Prueba de Doblado

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.

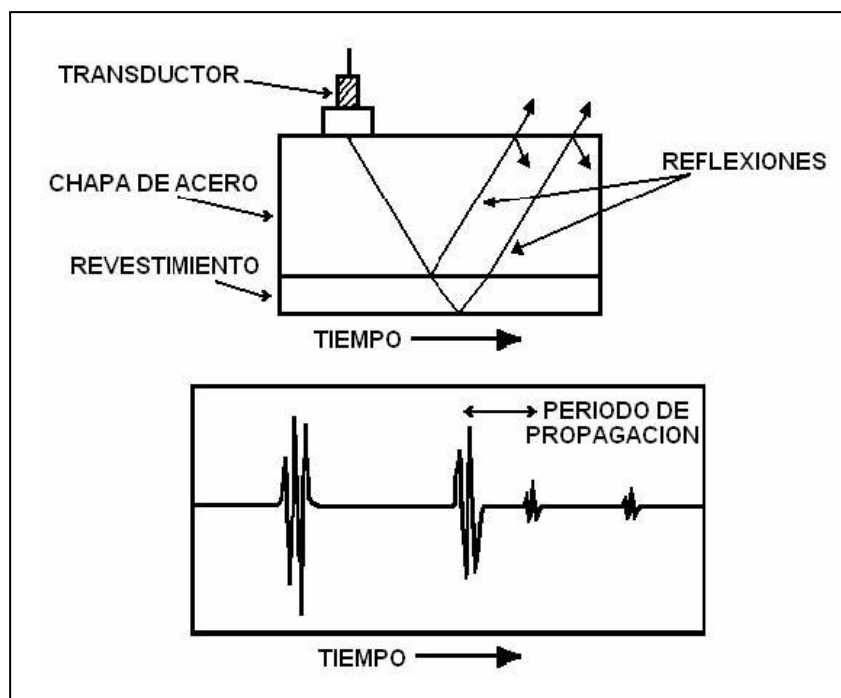


Figura 3.25: Técnica usada para medidas de ultrasonido

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.