

# 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.

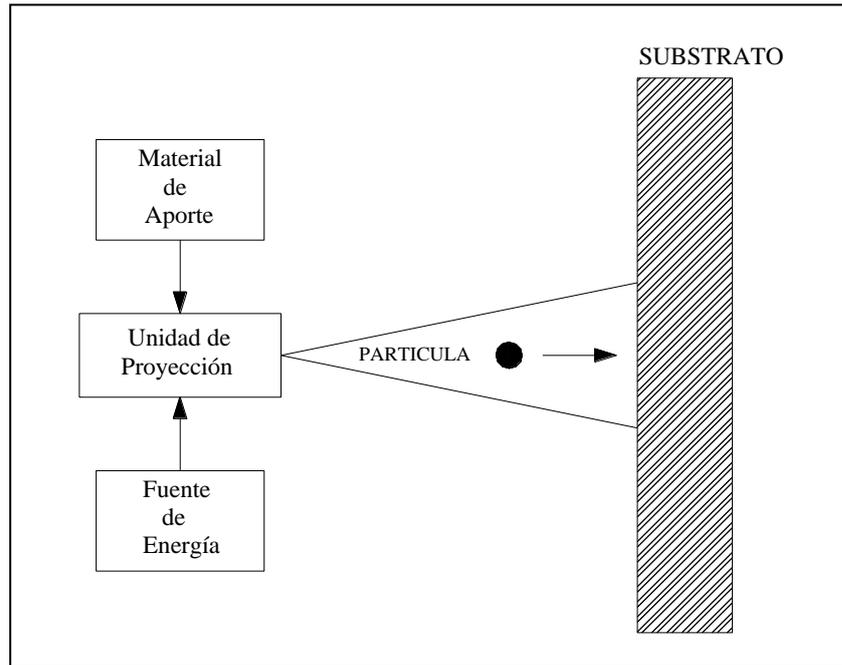
### **Generalidades del Proceso de Metalización**

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**

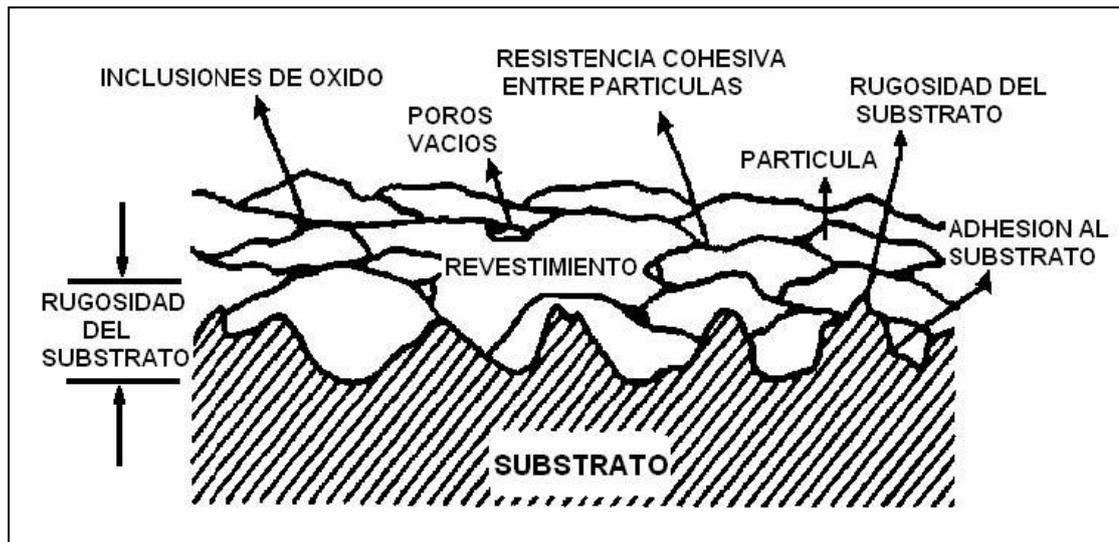
En la metalización o termorociado ocurren dos etapas definidas:

- (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 sustrato, 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 sustrato, 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.

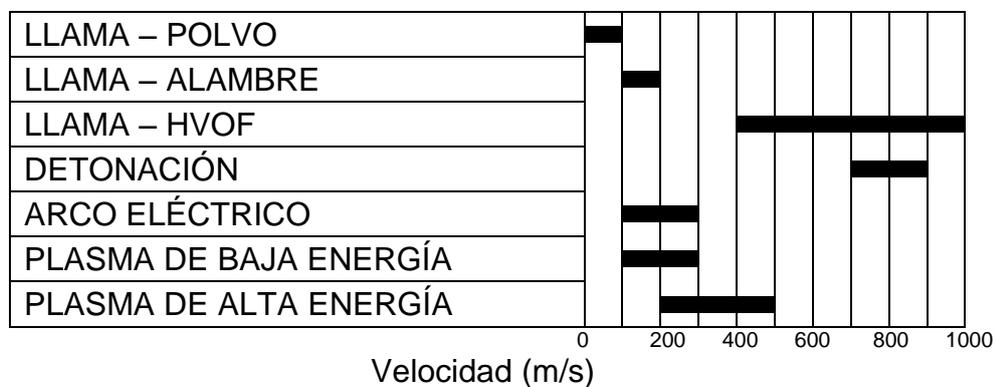
**Tabla 1: Temperatura de fuentes de calor para los diferentes procesos de Metalización**

<b>FUENTE</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
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 Acida	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 pie<sup>3</sup>/min (6.6 m<sup>3</sup>/hr) en la parte de la cara y 6 pie<sup>3</sup>/min (10 m<sup>3</sup>/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**

<b>Nivel de Ruido (dB)</b>	<b>hr / día</b>
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.