



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE  
ROCIADO TÉRMICO DE ACERO  
INOXIDABLE SOBRE ACEROS DE BAJO  
CONTENIDO DE CARBONO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A N :**

**ITZEL DEYNNY MORÁN GARCÍA**

**DAVID RAMÍREZ PÉREZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.I. EDUARDO GARDUÑO**

**CD. UNIVERSITARIA**

**OCTUBRE 2010**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Gracias infinitas a Dios por haberme dado la dicha de la vida, por estar presente en todos los momentos que he vivido y por la seguridad de saber que siempre seré escuchado por El con todo su amor.*

*A mis padres David y María Eugenia que durante mis estudios, y más aún, durante toda mi vida me han demostrado en todo sentido su apoyo incondicional, su confianza y su amor que me hacen sentir muy orgulloso y agradecido de que sean mis padres.*

*A la persona que me demuestra cada día que el amor de verdad existe, a la persona que con su amor me hace sentir completamente feliz, a ti que me entregas tu amor sin medida, a ti que siempre me apoyas y estas en todo momento a mi lado, a ti Ana María, por todo lo que eres, te amo.*

*A mi director de tesis Eduardo Garduño por la oportunidad de trabajar en la realización de esta tesis y por todo su tiempo brindado, a mi compañera Itzel por su apoyo y dedicación para la culminación de nuestra tesis, y a todos mis compañeros y profesores que de alguna manera contribuyeron en este proyecto.*

**David Ramírez Pérez**

## AGRADECIMIENTOS

*A mi madre, Elena, por darme la vida, por siempre apoyarme en mis estudios, por la dedicación y el tiempo invertido, por hacerme sentir orgullosa cada día y darme el ejemplo de siempre seguir adelante. A mi hermano Octaviano por cariño y apoyo en estos años.*

*A Josué, mi hermano, gracias por tu apoyo y compañía todos estos años, por las aventuras vividas y las que nos faltan, a ti más que un agradecimiento es una dedicación. Sigue adelante recuerda que siempre hay una luz al final del camino.*

*A mi esposo Víctor y mi hija Yaretzi por su amor, por su paciencia y apoyo, por las enseñanzas y la vida que nos falta, por su comprensión y cuidado para que este sueño se hiciera realidad.*

*A mis profesores Eduardo Garduño e Israel Garduño García, por su amistad y apoyo en la realización de este proyecto, a David por su amistad, apoyo y dedicación para terminar nuestra tesis. A mis amigos, compañeros y profesores que contribuyeron para la culminación de nuestro trabajo.*

***Itzel Deynny Morán García***

## **OBJETIVO**

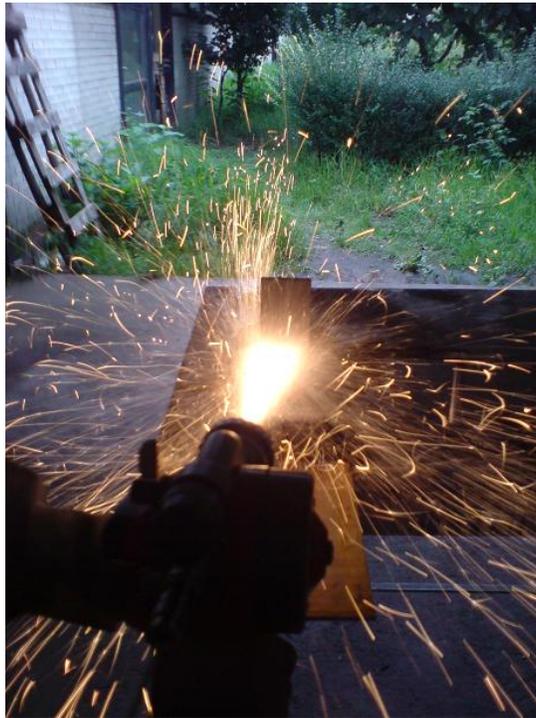
Caracterizar el proceso de proyección térmica por flama con alimentación de alambre, obteniendo parámetros del proceso que permitan la deposición de acero inoxidable AISI 420 sobre aceros de bajo contenido de carbono.

## INTRODUCCIÓN

El uso de tecnologías para recubrimientos superficiales es cada vez más requerido y utilizado hoy en día, entre los diferentes procesos existen diferencias y características que son un factor muy importante para su elección, como lo son geometría a recubrir, materiales de trabajo, espesor deseado entre otros.

La búsqueda de un recubrimiento con el cual se obtengan beneficios en cuanto a costos, manejabilidad y principalmente calidad, es el motivo por el cual, en este trabajo, se presenta la caracterización del proceso de proyección térmica por flama con alimentación de alambre de acero inoxidable alto en cromo sobre sustratos de acero de bajo contenido de carbono y geometría plana.

Los recubrimientos han sido pensados como soluciones de ingeniería para mejorar las superficies de las piezas contra desgaste, corrosión, degradación térmica entre otras características.



A continuación se indican los aspectos generales que presentan cada uno de los capítulos de este trabajo.

En el capítulo 1 se da una explicación de la forma en la cual se obtiene un recubrimiento por proyección térmica, desde la forma en que se depositan los materiales sobre un sustrato, hasta el análisis de las características que se presentan como inclusiones o porosidades, se describen las características generales más importantes de los recubrimientos, así como sus propiedades y posibles aplicaciones.

El capítulo 2 describe a detalle cada uno de los diferentes procesos de proyección térmica, haciendo énfasis en las características del proceso, del equipo y del recubrimiento obtenido para tener en consideración los factores determinantes al momento de la elección del proceso que se utilizará.

El capítulo 3 describe las operaciones previas a la aplicación del recubrimiento, que son fundamentales para la obtención de recubrimientos de calidad, entre estas operaciones podemos encontrar el granallado o la limpieza del sustrato.

El capítulo 4 describe, de manera detallada, la forma en que los diferentes parámetros del proceso de proyección térmica influyen en el resultado de los recubrimientos obtenidos, dentro de estos parámetros se encuentran el control de temperatura sustrato/recubrimiento o la distancia boquilla/sustrato.

El capítulo 5 describe las diferentes operaciones a las que puede someterse una pieza después de la aplicación del recubrimiento, dentro de estas operaciones, los tratamientos de acabado como el maquinado o pulido mejoran la apariencia física, existen operaciones como la fusión que, por su parte, mejora las propiedades del recubrimiento a nivel microscópico como la porosidad y densidad.

El capítulo 6 describe a detalle, paso a paso, la forma en que se llevó a cabo este trabajo, desde las operaciones de preparación de un sustrato para la aplicación del recubrimiento, hasta el análisis final de las muestras.

En el capítulo 7 se muestran y analizan los resultados obtenidos en cada una de las operaciones realizadas, se dan propuestas de explicación de las mismas, y posteriormente se concluyen los todos aspectos que se manejaron en este trabajo.

Al final del trabajo se encuentra la sección de apéndices, en los cuales se pueden encontrar parámetros del equipo utilizado, diagramas del material de alimentación y un ejemplo del costo de recuperación de una pieza mediante el método de proyección térmica con alimentación de alambre.

## ÍNDICE

### ***CAPITULO 1. RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA, TEORÍA Y EQUIPOS.***

1.1	LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA CONTRA OTROS PROCESOS DE RECUBRIMIENTOS SUPERFICIAL .....	1
1.2	CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA.....	3
1.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESAMIENTOS .....	4
1.4	ESTRUCTURAS DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA PROPIEDADES Y MATERIALES .....	7
1.4.1	SPLAT	
1.4.2	INCLUSIONES DE ÓXIDO	
1.4.3	MINIMIZACIÓN DE INCLUSIONES	
1.4.4	POROSIDAD	
1.5	PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA .....	17
1.6	FUNCIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA .....	19
1.6.1	RECUBRIMIENTOS ANTIDESGASTE	
1.6.2	AISLAMIENTO TÉRMICO	
1.6.3	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	
1.6.4	RECUBRIMIENTOS INTENCIONALMENTE DESGASTABLES Y RESISTENTES A LA ABRASIÓN	
1.6.5	RECUBRIMIENTOS ELÉCTRICAMENTE CONDUCTORES Y AISLANTES	
1.6.6	RECUBRIMIENTOS PARA LA RESTAURACIÓN DIMENSIONAL	
1.6.7	RECUBRIMIENTOS PARA USO MEDICO	
1.6.8	RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS	

### ***CAPITULO 2. PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA***

2.1	PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA .....	26
2.1.1	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	
2.1.2	EQUIPO, COMPONENTES Y CONEXIONES	
2.1.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA	
2.2	PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR DEPOSICIÓN .....	30
2.2.1	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO Y EQUIPO	
2.2.2	CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO OBTENIDO POR DENOTACION	
2.2.3	D-Gun CONTRA OTROS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA	
2.3	PROYECCIÓN TÉRMICA POR COMBUSTIÓN DE ALTA VELOCIDAD (HIGH-VELOCITY OXIFUEL SPRAY “HVOF”) .....	32
2.3.1	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	
2.3.2	EQUIPO Y COMPONENTES	
2.3.3	CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO	
2.4	PROYECCIÓN POR ARCO ELÉCTRICO .....	36
2.4.1	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	
2.4.2	EQUIPO Y COMPONENTES	
2.4.3	CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO	
2.5	PROYECCIÓN POR PLASMA .....	42
2.5.1	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	
2.5.2	EQUIPO	
2.5.3	CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO	
2.6	PROCESO DE ROCIADO EN FRÍO (COLD SPRAY) .....	45
2.6.1	EQUIPO PARA ROCIADO EN FRÍO Y SUS PARÁMETROS DE PROCESO	
2.7	VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES Y ÁREAS DE FUTURO CRECIMIENTO .....	47

### ***CAPITULO 3. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE***

3.1 PROCESO DEL RECUBRIMIENTO .....	54
3.2 METALURGIA E HISTORIA TÉRMICA DE LOS SUSTRATOS .....	54
3.3 CONFIGURACIÓN DE LA PIEZA Y LOCALIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO .....	55
3.4 REACONDICIONAMIENTO DE LA SUPERFICIE O SUSTRATO .....	58
3.5 INICIO DE LA PROYECCIÓN .....	63
3.6 APLICACIÓN DE UNA CAPA DE ADHESIÓN .....	63
3.7 ¿POR QUÉ USAR UNA CAPA DE ADHESIÓN? .....	65
3.8 SOCAVACIÓN .....	66
3.9 ENMASCARAMIENTO .....	66
3.10 PRECALENTAMIENTO .....	67

### ***CAPITULO 4. OPERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA.***

4.1 PATRÓN DE ROCIADO .....	68
4.2 CONTROL EN EL AUMENTO DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO .....	70
4.2.1 MICROESTRUCTURA TÍPICA DEL RECUBRIMIENTO.	
4.2.2 EFECTO DE LA GEOMETRÍA EN EL AUMENTO DE ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.	
4.3 USO DE DISPOSITIVOS DE ENFRIAMIENTO POR AIRE PARA MINIMIZAR LAS IMPUREZAS .....	71
4.4 RELACIÓN ENTRE EL GRADO DE FUSIÓN DE LAS PARTÍCULAS Y LA ESTRUCTURA DEL RECUBRIMIENTO .....	72
4.4.1 CONTROL DE TEMPERATURA SUSTRATO/RECUBRIMIENTO.	
4.4.2 DEGRADACIÓN DEL SUSTRATO.	
4.4.3 OXIDACIÓN.	
4.4.4 CONTRACCIÓN / EXPANSIÓN.	
4.4.5 MOVIMIENTO ENTRE LA ATMÓSFERA Y EL SUSTRATO.	
4.5 CONTROL DE LAS VARIABLES DE MOVIMIENTO .....	73
4.5.1 DISTANCIA BOQUILLA-SUSTRATO (STAND-OFF).	
4.5.2 PATRÓN DE ROCIADO NORMAL AL SUSTRATO.	
4.5.3 CONSUMO DEL MATERIAL DE ALIMENTACIÓN.	
4.5.4 MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE LA PIEZA DE TRABAJO Y LA BOQUILLA.	
4.5.6 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE BARRIDO.	
4.5.7 EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN.	
4.5.8 CÁLCULO DEL CONSUMO ESTIMADO DE MATERIAL A PROYECTAR Y CÁLCULO DE LA TASA DE PRODUCCIÓN.	
4.6 SEGURIDAD DURANTE EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO POR PROYECCIÓN TÉRMICA. ....	79

### ***CAPITULO 5. OPERACIONES POSTERIORES A LA APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO***

5.1 TRATAMIENTOS DE ACABADO .....	82
5.1.1 MAQUINADO	
5.1.2 ESMERILADO	
5.1.3 PULIDO	
5.2 DENSIFICACIÓN .....	85
5.3 FUSIÓN .....	85
5.4 SELLADO .....	87
5.5 TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL .....	88
5.6 COMPRESIÓN ISOSTÁTICA EN CALIENTE .....	88

5.7 TRATAMIENTO TÉRMICO .....	88
5.8 VITRIFICACIÓN CON LÁSER .....	89
5.9 INSPECCIÓN .....	90
5.9.1 ENSAYOS DESTRUCTIVOS	
5.9.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
5.10 CONTROL DEL EQUIPO DEL PROCESO.....	91
5.10.1 PARÁMETROS DEL PROCESO	
5.10.2 LAS VARIABLES DE MANIPULACIÓN	
5.10.3 LA VARIABLE DEL TIEMPO	
5.10.4 LA MASA	
5.11 ALIMENTACIÓN DE MATERIAL .....	92
<b><i>CAPITULO 6. EXPERIMENTACIÓN.....</i></b>	<b>94</b>
<b><i>CAPITULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</i></b>	<b>101</b>
<b><i>CONCLUSIONES .....</i></b>	<b>113</b>
<b><i>BIBLIOGRAFÍA .....</i></b>	<b>115</b>
<b><i>APÉNDICES</i></b>	
A1 PARAMETROS PARA EL EQUIPO DE METALIZADO SPRAY JET-96 .....	116
A2. CARACTERÍSTICAS Y DIAGRAMAS DEL ACERO INOXIDABLE: Fe 13Cr 0.5Si 0.5Ni 1Mn 0.35C (AISI 420) .....	117
A3. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE COSTO TOTAL APROXIMADO PARA LA RECUPERACIÓN DIMENSIONAL DE LA SUPERFICIE DEL DISCO DE UN FRENO DE DISCO DE AUTOMOVIL POR PROYECCIÓN TÉRMICA .....	119

## CAPÍTULO 1. RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA, TEORÍA Y EQUIPOS.

Los aspectos fundamentales del proceso de proyección térmica se ilustran en la figura 1.1, la cual muestra partículas impactándose sobre una superficie previamente preparada para formar una estructura laminar característica de los procesos de proyección térmica.

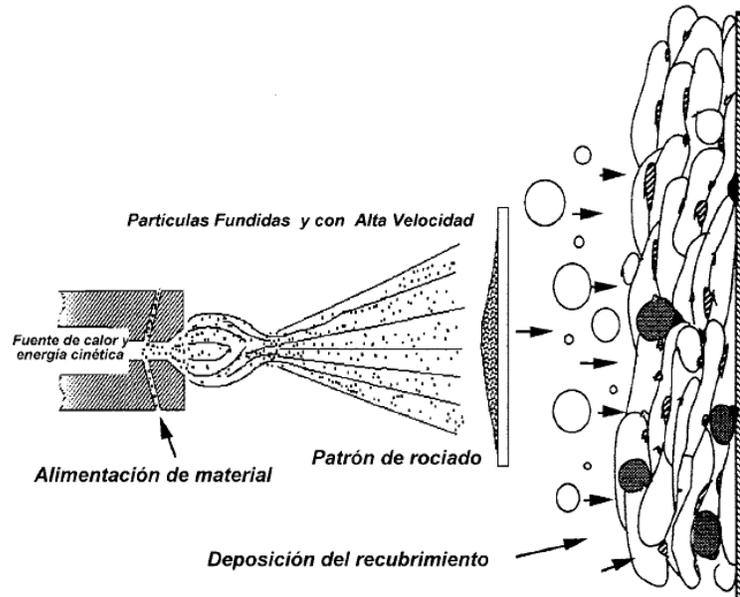


Fig. 1.1 Deposición del recubrimiento<sup>1</sup>.

### 1.1 LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA CONTRA OTROS PROCESOS DE RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL.

Los procesos de proyección térmica difieren de otros procesos para producir recubrimientos en que no son atomísticos, es decir, no depositan materiales sobre superficies en forma de iones individuales, átomos o moléculas. En vez de eso, las partículas del material a proyectar son depositadas en forma de gotitas, partículas sólidas o semifundidas sobre la superficie a recubrir.

Los materiales a proyectar se presentan usualmente en forma de polvos, barras o alambres. Dichos materiales alimentan al equipo para proyección térmica, posteriormente por medio de la energía generada por la combustión de gases, un arco eléctrico o plasma son calentados hasta el punto en el cual dichos materiales tienen un comportamiento como partículas fundidas. Habiendo alcanzado este estado, son entonces atomizados y rociados al sustrato.

La proyección térmica difiere también de otros procesos en que el recubrimiento sólo se forma en las porciones de superficie que han sido apuntadas con el dispositivo de

<sup>1</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 43

proyección, lo cual permite la obtención de recubrimientos de espesores constantes (hasta cierto grado dependiendo del proceso) o múltiples dentro del mismo sustrato.

Debido a que los procesos de proyección térmica son procesos de alta entalpía, se caracterizan por tener altas tasas de enfriamiento en relación a otros procesos de obtención de recubrimientos, por ejemplo la Deposición Química de Vapor (CVD), la Deposición Física de Vapor (PVD) o la Electrodeposición. Otra ventaja de los procesos de proyección térmica incluye la capacidad de depositar recubrimientos gruesos en poco tiempo. Adicionalmente, los procesos de proyección térmica son capaces de operar en un extenso rango de temperaturas, velocidades y condiciones atmosféricas, permitiéndoles ser aplicados en una gran variedad de materiales.

A continuación se muestra la tabla 1.1 en la que se compara algunos de los procesos de obtención de recubrimientos con respecto del proceso de proyección térmica.

<b>Característica del equipo</b>	<b>Recubrimiento electrolítico</b>	<b>Proyección Térmica</b>	<b>CVD</b>	<b>PVD</b>
Costo de equipo	Bajo	De bajo a moderado	Moderado	De moderado a alto
Costo de operación	Bajo	De bajo a moderado	De bajo a moderado	De moderado a alto
Entorno del proceso	Solución acuosa	De atmosférico a cámara de vacío	Atmosférico y cámara de medio vacío	Alto vacío
Geometría de recubrimiento	Omnidireccional	Limitado al área de impacto	Omnidireccional	Limitado al área de impacto
Espesor de recubrimiento	De moderado a grueso: de 10µm-mm	Grueso: 50µm-cm	Delgado a grueso, 0.1µm-mm	De muy delgado a moderado
Temperatura del sustrato	Bajo	De bajo a moderado	Moderado a alto	Bajo
Adherencia	De adhesión mecánica moderada a muy buena adhesión química	Buena adherencia mecánica	De muy buena adherencia química a excelente adhesión por difusión	De moderada unión mecánica a buena unión química
Acabado superficial	De moderadamente áspero hasta brillante	De áspero a suave	De suave a brillante	De suave a muy brillante
Materiales para recubrimiento	Metales	Polvo/alambre, polímeros, metales/cerámicos	Metales, cerámicos y polímeros	Metales, cerámicos, polímeros

Tabla 1.1 Comparación de algunos procesos de obtención de recubrimientos<sup>2</sup>.

Los recubrimientos por proyección térmica han sido considerados para elaborar recubrimientos sobrepuestos, es decir, como materiales añadidos a una superficie o de otro material llamado “el sustrato” en donde se da una pequeña o nula disolución sólida, preservando así la composición del material base (sustrato). Algunas formas de tratamientos superficiales son enteramente difusionales por naturaleza. En dichos tratamientos superficiales, los materiales que modifican la superficie del sustrato se añaden a éste mediante procesos de difusión, los cuales tienen lugar debajo de la superficie del sustrato, provocando un nulo aumento en el espesor de la pieza. Además puede ocurrir que el sustrato y el recubrimiento generen aleaciones formando así fases y/o compuestos protectores de la superficie.

La difusión y formación de aleaciones también aparecen frecuentemente en los recubrimientos por proyección térmica, pero la zona de reacción es sumamente reducida debido a la alta tasa de enfriamiento de las partículas fundidas. Dicha tasa de enfriamiento

<sup>2</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 35

que ocurre durante el impacto, se debe al gran tamaño y baja temperatura del sustrato en relación con el tamaño y la temperatura de las partículas.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA.

La figura 1.2 ilustra los principales procesos de proyección térmica:

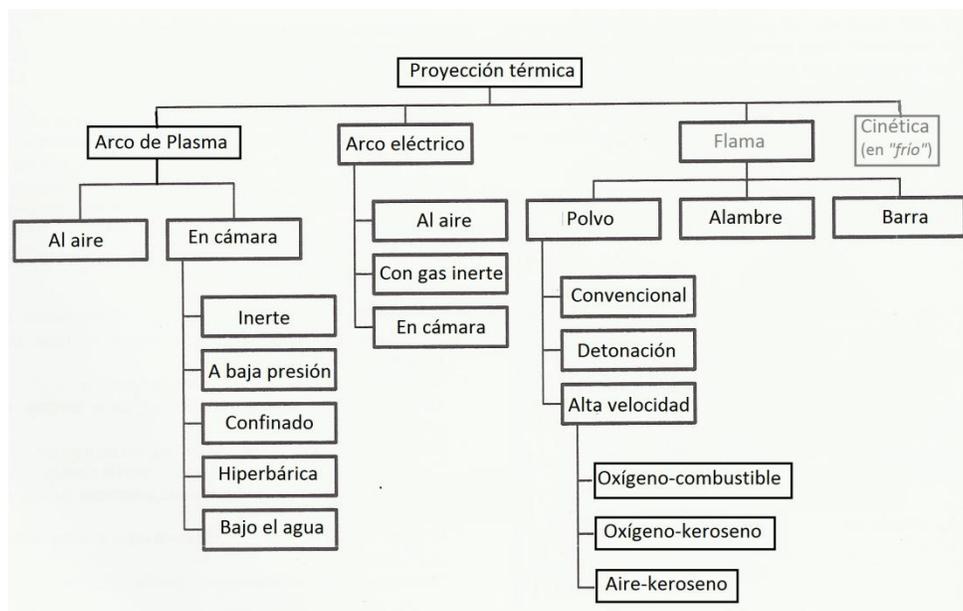


Figura 1.2 Procesos de Proyección Térmica.<sup>3</sup>

Cada uno de esos procesos encierra a muchas más subcategorías, y cada una de éstas tiene sus propios rangos característicos de temperatura, entalpía y velocidad. Estos atributos permiten desarrollar, a cada proceso de proyección térmica, características únicas del recubrimiento obtenido: Adherencia, porosidad, inclusiones (óxidos comúnmente) y dureza.

<sup>3</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 44

### 1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS

La figura 1.3 es una representación esquemática de un proceso de proyección térmica que usa el material del recubrimiento en presentación de polvos. Dicha representación realza las principales características de procesamiento que afectan a la calidad del recubrimiento.

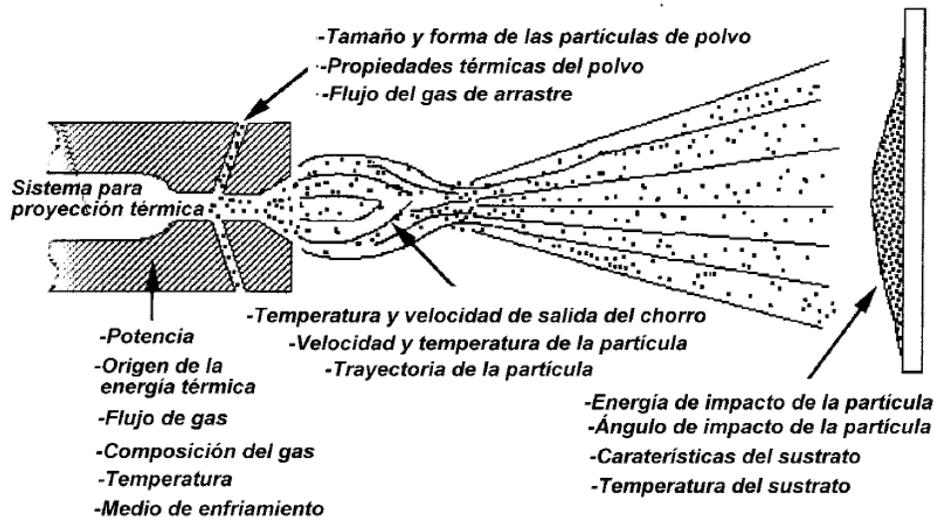


Figura 1.3 Proceso típico de proyección térmica.<sup>4</sup>

La temperatura de una partícula dada en el proceso es función de su velocidad, trayectoria y de sus propias propiedades físicas y térmicas. Las temperaturas de los gases en la corriente rociada varían ampliamente de un proceso a otro. En los procesos de proyección por flama, la temperatura es determinada, en este orden, por las características del combustible, la relación aire (u oxígeno)-combustible y la presión en la cámara o zona de combustión. Las temperaturas que alcanzan los combustibles más comunes están en el rango de 2540 a 3150°C (4600 a 5700°F). Lo que no es frecuentemente tomado en cuenta es el gran calor generado por estos procesos. Una antorcha promedio que usa una mezcla de oxiacetileno para este proceso genera de 20 a 50 MJ (20,000 a 50,000 Btu). Los procesos HVOF (o de alta velocidad) generan entre 500 MJ y 1GJ (500,000 y 1,000,000 Btu).

Los dispositivos de arco por plasma operan con energías de 72 a 720 MJ (20kW a 200kW), lo cual es el equivalente eléctrico de 68,280 a 682,800 Btu. La temperatura típica del arco de plasma es de 20,000 °C (36,000 °F), la cual es considerablemente superior a la del punto de fusión de cualquier sustancia conocida hasta la fecha. Las pistolas de arco eléctrico operan con energías de entre 1.3 y 36 MJ (0.38 y 10 kW). Las pistolas de arco eléctrico de alta tasa de rociado operan con energías superiores a los 132 MJ (37.5 kW).

A continuación se muestra la tabla 1.2 en la que se dan algunas de las características más importantes de los procesos de proyección térmica por flama.

<sup>4</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 45

Atributo	Proyección por flama	HVOF	D-Gun	Arco Eléctrico	Arco de plasma al aire	Arco de plasma al vacío
<b><u>Chorro</u></b>						
Temperatura, K	3500	5500	5500	>25,000	15,000	12,000
Velocidad, m/s	10-100	500-1200	>1000	50-100	300-1000	200-600
Flujo de gases, sLm	100-200	400-1100	.....	500-3000	100-200	150-250
Tipos de gases	O <sub>2</sub> , acetileno	CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , acetileno	Aire, N <sub>2</sub> , Argón	Ar, He, H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	Ar, He, H <sub>2</sub>
Potencia suministrada, kW	20	150-300	.....	2-5	40-200	40-120
<b><u>Material de alimentación</u></b>						
Temperatura máxima de la partícula, °C	2500	3300	.....	>3800	>3800	>3800
Velocidades de partícula, m/s	50-100	200-1000	.....	50-100	200-800	200-600
Tasa de alimentación de material, g/min	30-50	15-50	.....	150-2000	50-150	25-150
Velocidad de impacto de la partícula, m/s	30(usando polvo), 180 (usando alambre)	610-1060	910	240	240	240-610
<b><u>Recubrimiento obtenido</u></b>						
Rango de densidad (%)	85-90	>95	>95	80-95	90-95	90-99
Resistencia de adhesión, Mpa	7-18	68	82	10-40	<68	>68
Contenido de óxidos	Alto	Moderado	Bajo	Moderado a alto	Moderado	Nulo

Tabla 1.2. Características de los procesos de proyección térmica por flama. <sup>5</sup>

La temperatura y velocidad varían considerablemente al interior del chorro, debido a varios factores. El más significativo de éstos es la diferencia en temperatura entre el núcleo del chorro y su entorno relativamente frío. Los chorros de plasma están confinados por ánodos o boquillas enfriadas con agua. Los procesos por flama, con unas cuantas excepciones, usan dispositivos enfriados por aire operando a temperatura ambiente. La temperatura decae del chorro a los alrededores en varios miles de grados centígrados a través de unos cuantos milímetros de separación. Esta caída de temperatura provoca una correspondiente caída en la velocidad y un incremento en la viscosidad del gas en los alrededores de los límites exteriores del chorro.

La temperatura y la velocidad también decaen en tanto el chorro se aleja de la boquilla. Se concluye que existen gradientes tanto axiales como radiales de la temperatura, la velocidad

<sup>5</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 54

y la viscosidad del gas. Dentro de estas complejas distribuciones, una distribución de polvo es inyectada. Sobre la superficie de la pieza a recubrir, el proceso luce caótico; sin embargo estas interacciones son favorables, sean por diseño o por casualidad.

La figura 1.4 ilustra esquemáticamente el “tiempo de estancia” de partículas hipotéticas, indicado como diferentes trayectorias de partículas conllevan diferentes rangos de temperatura y tiempos de permanencia. Un rango en el tiempo de estancia es característico de un proceso de proyección térmica o de un conjunto de parámetros de proyección. Es necesario enfatizar que para un proceso de proyección térmica dado, no existen tiempos de estancia específicos ni temperaturas específicas. En vez de cifras absolutas, los tiempos de estancia y las temperaturas se definen en términos de valores promedio para las distribuciones.

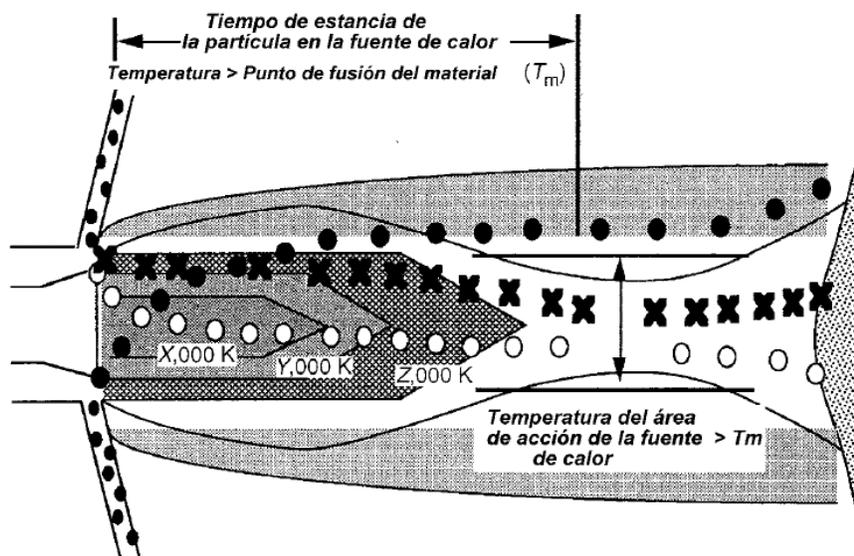


Figura 1.4 Tiempo de estancias de partículas hipotéticas.<sup>6</sup>

La distribución de partículas en estos chorros es acelerada mediante la distribución de velocidades del gas a través de una distribución de temperaturas. Como resultado, las velocidades finales de las partículas dependen de las trayectorias de éstas y de las fuerzas de arrastre ejercidas por el chorro hacia las partículas. Se puede asumir que las altas velocidades en el chorro generan altas velocidades promedio en las partículas. También se puede asumir que altas entalpías producen altas temperaturas promedio en las partículas. La velocidad de las partículas es particularmente importante pues es generalmente aceptado que las velocidades en la partícula producen una alta energía de impacto entre ésta y la superficie a recubrir. Esta alta energía cinética produce un alto grado de deformación en la partícula, resultando en una mejor adhesión y una alta densidad de recubrimiento. También se acepta que altas velocidades en la partícula provocan tiempos de permanencia más cortos, repercutiendo en un menor tiempo de calentamiento de la partícula. Las bajas temperaturas en la partícula pueden reducir la densidad del recubrimiento, debido a que un porcentaje significativo de partículas sin fundir o parcialmente fundidas se integran al

<sup>6</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 45

recubrimiento. El incremento en la entalpía del chorro puede compensar esta disminución en el tiempo de permanencia. Temperaturas de partículas más bajas no siempre pueden repercutir en una baja en la calidad recubrimiento, pues se reduce la oxidación en las partículas, tal y como sucede en algunos procesos por plasma.

La distribución de la temperatura promedio de la partícula y la distribución de la velocidad, determinan la adherencia, porosidad y formación de inclusiones tales como óxidos. Esto es particularmente cierto cuando el proceso de proyección térmica se realiza al aire libre, en donde el tiempo y temperatura de las partículas en el chorro determinan el nivel de interacción que éstas tienen con el aire arrastrado. En resumen, la temperatura final, la velocidad y las interacciones ambientales de la distribución de la partícula se relacionan con la velocidad particular del chorro, su temperatura y el resultante tiempo de permanencia, lo cual a su vez, repercute en las propiedades y microestructura del recubrimiento resultante.

Las observaciones anteriores sólo son válidas si las partículas han sido calentadas en un chorro para proyección térmica. En los procesos de proyección por arco eléctrico, conocidos también como proyección térmica por arco con alambre, los cuales son posteriormente fundidos por un arco eléctrico para formar partículas, no hay chorros de gases calientes asociados a estos procesos.

A diferencia de otros procesos de proyección térmica, la temperatura de las partículas fundidas comienza a decrecer inmediatamente después de que las partículas han sido fundidas y atomizadas en la zona de acción del arco eléctrico, abandonando la punta del alambre en cuanto han sido fundidas. El tiempo de permanencia que en otros procesos produce un calentamiento creciente solo sirve para enfriar a las partículas en los procesos de proyección por arco eléctrico, debido a que el chorro de partículas atomizadas solo es usado para acelerar a las partículas en su trayecto hacia la superficie a recubrir. Sin embargo, desde que las partículas siguen calientes a partir del proceso de fundición, las interacciones entre el aire y la superficie de las partículas calientes aún tienen lugar: los óxidos se dispersan durante el impacto y se agregan a la deposición, tal y como ocurre con otros procesos de proyección térmica.

A pesar de las diferencias en sus orígenes entre los procesos por plasma, combustión o arco eléctrico, una vez generadas las partículas fundidas, éstas se impactan y deforman en la superficie de la pieza a recubrir de manera muy similar. Las diferencias físicas entre los diversos procesos de proyección térmica, (esto es, tamaño de las partículas, velocidades y temperaturas) y las temperaturas de los chorros generados en cada proceso distinto, provocan grandes variaciones en los recubrimientos obtenidos.

#### *1.4 ESTRUCTURAS DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA, PROPIEDADES Y MATERIALES.*

Los rasgos más importantes de un Recubrimientos por Proyección Térmica (RPT), cuya combinación determina las propiedades de dicho recubrimiento, incluyen la estructura laminar o resolidificadas, los poros, las inclusiones de óxidos, los granos, las fases presentes, las grietas y las intercaras de la adhesión. La figura 1.5 ilustra esquemáticamente

las características típicas de un RPT y hace una representación de la microestructura de éste.

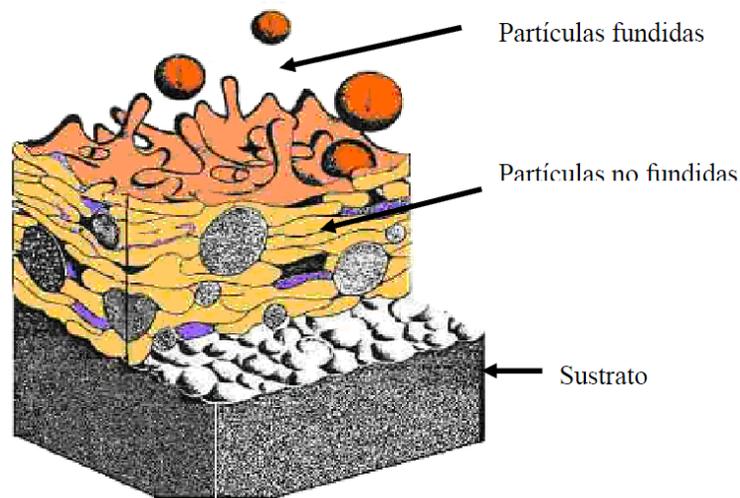


Figura 1.5 Estructura del recubrimiento por proyección térmica.<sup>7</sup>

#### 1.4.1 SPLAT.

“Splat” es un término que se refiere a una gota/partícula impactada, tal y como se ilustra en la figura 1.6. Varios splats superpuestos y contiguos se adhieren unos a otros para formar una capa contigua de recubrimiento. Los splats se forman cuando las partículas previamente fundidas y aceleradas del recubrimiento, se impactan sobre una superficie previamente preparada. Las partículas antes del impacto, tienen generalmente forma esférica, y en el momento del impacto éstas se extienden sobre el sustrato y llenan los intersticios propios de la rugosidad de la superficie. Las gotas/partículas se aplanan para formar estructuras en forma de discos, las cuales cuando son preparadas en una metalografía de un corte transversal, lucen como las microestructuras representadas en las figuras 1.7 a), b). En estas figuras, los splats se ven por el borde, formando una estructura laminar características de los RPT.

<sup>7</sup> Estructura del recubrimiento. Fuente: <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>

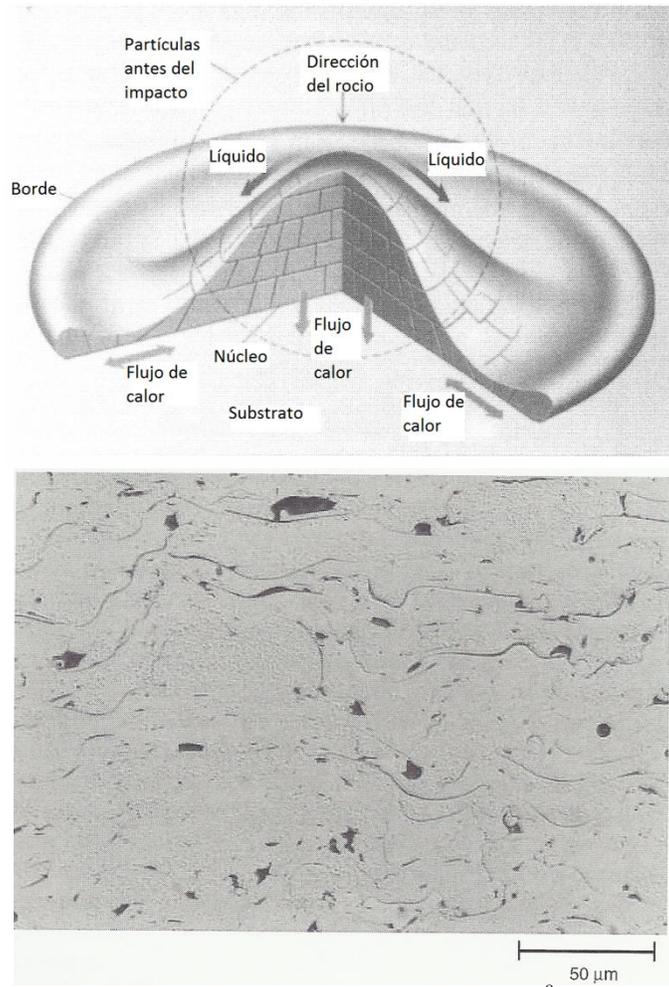


Figura 1.6 Estructura de un splat.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pp. 48, 220

Las figuras 1.7 a) y b) muestran micrografías de un recubrimiento cerámico de 8% en peso de zirconia estabilizada con Ytrio la primera, y un recubrimiento de acero de bajo carbono proyectado por arco eléctrico la segunda respectivamente. Nótese que ambos recubrimientos exhiben la estructura laminar característica.

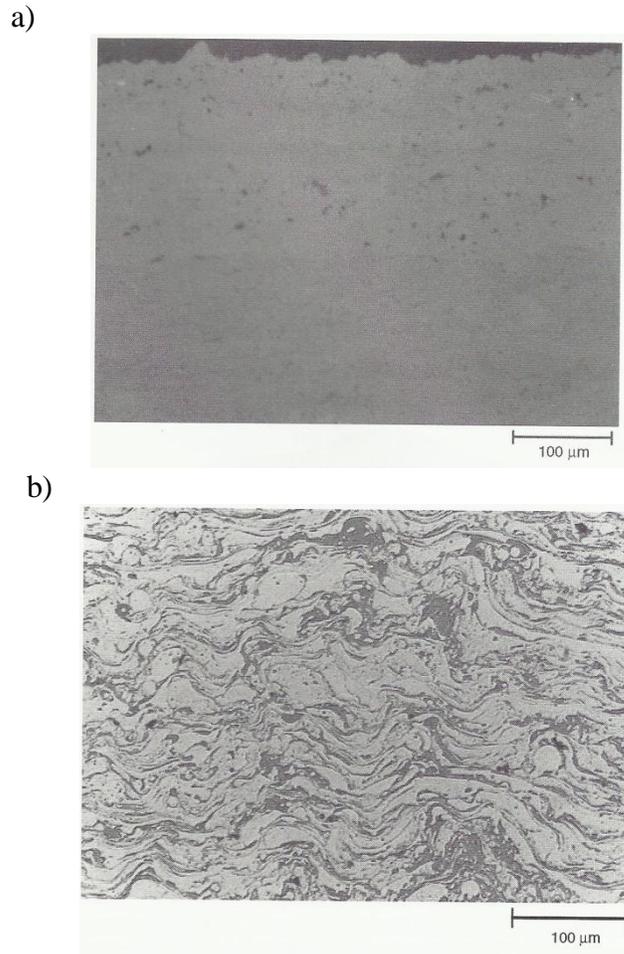


Figura 1.7 a) Proyección por plasma, zirconia estabilizada con Ytrio al vacío.  
b) Proyección por arco eléctrico, acero de bajo carbono.<sup>9</sup>

La estructura de un splat dentro de un recubrimiento es un indicativo del grado de derretimiento alcanzado por la partícula. En los recubrimientos por arco eléctrico, también son típicas e indican que las gotas atomizadas no han sido solidificadas antes del impacto. El grado de derretimiento en la estructura del recubrimiento influye generalmente en la determinación de la cohesión, la porosidad y las subsecuentes propiedades del recubrimiento.

Los recubrimientos por proyección térmica también se caracterizan por una rápida solidificación del material fundido. El calor es liberado rápidamente debido a la gran diferencia en masas entre la partícula y el sustrato, y por supuesto, a la alta temperatura del

<sup>9</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 48

recubrimiento fundido en relación con la temperatura del sustrato. Las tasas de enfriamiento (para metales) están en el rango de  $10^5$  a  $10^8$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ]. Estas rápidas tasas de enfriamiento producen una amplia gama de estados del material, desde amorfo hasta metaestable. Dos estructuras se presentan al interior de un RPT: estructuras splat y estructuras intrasplat. Al interior de los splats, la rápida solidificación crea tamaños de grano inferiores a  $5[\mu\text{m}]$  y evita que muchos materiales alcancen sus fases de equilibrio, lo cual provoca propiedades anisotrópicas del recubrimiento. A pesar de la posibilidad de la existencia de inclusiones de óxido en el recubrimiento, la rápida solidificación y el rápido procesamiento térmico en los RPT conducen a una homogeneidad composicional, representativa de las composiciones iniciales del material a proyectar.

#### *1.4.2 INCLUSIONES DE ÓXIDO.*

Las inclusiones de óxido en recubrimientos metálicos, aparecen generalmente en color negro en las micrografías, con formas que asemejan cuerdas o hebras, vistas en la sección transversal del recubrimiento, paralela a la superficie del sustrato.

Los óxidos se producen por la interacción entre partícula-atmósfera y/o el calentamiento de la superficie a recubrir durante la deposición de los materiales que conforman el recubrimiento. La interacción de las partículas calientes con su ambiente alrededor (usualmente aire) conducen a la formación de películas de óxido y/o nitruro sobre la superficie de dichas partículas.

Tiempos de permanencia largos y altas temperaturas de las partículas, incrementan el espesor de las capas de óxido y/o nitruro, provocando altas concentraciones de inclusiones dentro del recubrimiento. En tanto las partículas se extienden con el impacto, las películas de óxido se fracturan con el flujo del metal sobre la superficie, y se embeben en el depósito de material en tanto las gotas de éste van solidificando en forma de splats, tal y como se observó en las figuras anteriores.

Se han encontrado que dichas inclusiones le añaden dureza al recubrimiento. La dureza propia de los óxidos excede de los 1000 DPH. En consecuencia, la composición mixta del metal y los óxidos metálicos es más dura que el metal en sí mismo. Este incremento en la dureza del recubrimiento lo vuelve más frágil, debido a que los óxidos se pueden fracturar con mayor facilidad que el resto del recubrimiento. Si existe una gran concentración de óxidos, éstos también pueden interferir en la cohesión de un splat a otro, lo que conlleva una disminución en la resistencia de la cohesión del recubrimiento.

Las inclusiones de óxidos y nitruros se consideran nocivas para el resto de las propiedades deseadas en el recubrimiento. Sin embargo, en algunas aplicaciones, las inclusiones son deseadas debido a que ellas pueden aumentar la resistencia al desgaste o disminuir la conductividad térmica del recubrimiento.

#### *1.4.3 MINIMIZACIÓN DE INCLUSIONES.*

Las tendencias en los parámetros que minimizan a las inclusiones son:

- Remover el ambiente reactivo a través del uso de un gas inerte al interior de una cámara aislante.
- Reducir la temperatura promedio de las partículas mediante la reducción de la capacidad de calentamiento de los chorros de los equipos para proyección térmica.
- Reducción en el tiempo de permanencias, minimizando la distancia de proyección y/o aumentando la velocidad del chorro.
- Reducción de la temperatura sustrato-recubrimiento usando chorros de aire de enfriamiento o incrementando la velocidad del dispositivo de proyección térmica (velocidad de rociado superficial), minimizando de este modo la oxidación sobre la superficie del recubrimiento.
- Usando un apropiado tamaño en las partículas del polvo de alimentación. Las partículas que tienen una baja relación de área en su superficie/volumen, tienden a minimizar el contenido general de óxidos.

#### 1.4.4 POROSIDAD: FUENTES QUE ORIGINAN LA POROSIDAD Y CONTROL.

La porosidad es otro importante rasgo de los recubrimientos que influye fuertemente en las propiedades de éstos. Tal y como ocurre en las inclusiones de óxido, la porosidad puede ser una característica deseable. La postura más general es que la porosidad es indeseable. La porosidad genera una pobre adhesión del recubrimiento al sustrato permitiendo de este modo altas tasas de desgaste y óxidos. La porosidad se asocia generalmente con un alto número de partículas sin fundir o bien, resolidificadas que quedan embebidas en el recubrimiento, como se muestra en la figura 1.8.

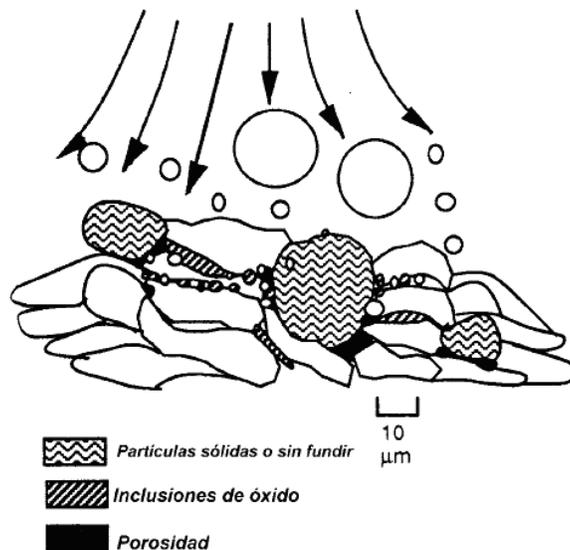


Figura 1.8 Defectos del recubrimiento por proyección térmica. <sup>10</sup>

La pobre presencia de splats o la pobre cohesión entre partículas conduce a una prematura delaminación, agrietamiento, astillamiento o quebrantamiento del recubrimiento.

<sup>10</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 49

La porosidad al descubierto, puede interconectar al ambiente con la superficie a recubrir, lo cual tiende a ocasionar corrosión u oxidación en ésta. La porosidad puede eliminar las características anticorrosivas propias de la composición del recubrimiento.

Respecto al endurecimiento superficial o los recubrimientos resistentes al desgaste, la porosidad disminuye la dureza del recubrimiento y contribuye a un acabado superficial pobre, disminuyendo de este modo la resistencia al desgaste. La porosidad en esta clase de recubrimientos también conduce a la generación de fragmentos (astillas) del recubrimiento que se convierten en elementos abrasivos aumentando así las tasas de desgaste.

En muchas aplicaciones, la alta rugosidad en el acabado típico de los RPT, debe ser maquinada antes de que la pieza recubierta entre en servicio. Dicho maquinado frecuentemente pule la superficie para producir acabados superficiales por debajo de  $1[\mu\text{m}]$ . Sobre algunas superficies para uso en cojinetes, los recubrimientos deben ser pulidos por debajo de  $0.1[\mu\text{m}]$ , produciendo acabado tipo espejo.

La alta porosidad evita que esos acabados puedan ser alcanzados produciendo picaduras superficiales y acabados pobres, no uniformes por maquinado. A pesar de la disminución en la adhesión del recubrimiento y en la baja protección anticorrosiva, la porosidad no siempre es indeseable. Cojinetes impregnados con aceite/grasa o cojinetes de lubricante sólido pueden ser producidos a través de la creación de recubrimientos con porosidad del 10 al 30% en los cuales el lubricante pueda infiltrarse.

La porosidad también es deseable en Barreras Térmicas (BT) hechas con cerámicos, ampliamente usadas en turbinas de todo tipo y en motores diesel. Las BT se componen generalmente de óxidos cerámicos, los cuales por sí mismos son buenos aislantes térmicos. Una porosidad del 8 al 15% en estos recubrimientos incrementa sus propiedades aislantes. Dicha porosidad también incrementa la resistencia al choque térmico y la resistencia a la fatiga térmica en dichas BT.

Las prótesis por implante médico son otra aplicación usual de los recubrimientos porosos, en donde hasta un 40% en porosidad es intencionalmente incluida. Dicha porosidad se usa para permitirle a la materia ósea crecer dentro del recubrimiento, lo cual acelera el proceso de sanación del paciente y disminuye el tiempo de recuperación de éste.

#### *FUENTES QUE ORIGINAN LA POROSIDAD.*

Debido a que la porosidad es un rasgo microestructural importante, sus orígenes deben ser entendidos y controlados. La porosidad puede originarse por:

- La contracción del material durante su enfriamiento a partir del estado líquido.
- La presencia de partículas embebidas sin fundir, parcialmente fundidas o resolidificadas que conducen a la formación de espacios vacíos.
- La creación de espacios vacíos debido a la “sombra” que producen las partículas embebidas sin fundir lo cual evita que las gotas permeen a través del espacio sombreado.

- Una pobre adhesión intrasplat, originando la separación de los splats.
- Un pobre esparcimiento de las partículas entre las superficies adyacentes o splats, lo que puede ser ocasionado por el enfriamiento, el movimiento lento de las partículas o debido a fenómenos de tensión superficial.
- Presencia de grietas intersplats o intrasplat.
- Altos ángulos de deposición, que generan zonas ensombrecidas.
- Rebotes de partículas en paredes ajenas a la pieza a recubrir que provocan el enfriamiento o resolidificación prematura de las partículas antes de que impacten sobre el sustrato.
- Sombras debidas a la presencia de superficies adyacentes.
- Porosidad inherente de los polvos debido a su proceso de manufactura.

De esta lista, la fuente más común de la porosidad en un RPT son las partículas embebidas sin fundir o resolidificadas. Dependiendo de la temperatura de las partículas, el arribo de las gotas puede cubrir un rango completo de estados líquidos o sólidos. El flujo de partículas líquidas- sólidas puede llenar fácilmente la mayoría de los espacios vacíos en la superficie del sustrato, como se muestra en la figura 1.9.



Figura 1.9 Características estructurales de las partículas impactadas. <sup>11</sup>

Las partículas sólidas, algunas de las cuales rebotan con el sustrato, pueden terminar adhiriéndose en otra parte del sustrato o quedar embebidas en él. Estas partículas no se adhieren bien o pueden no estar en contacto íntimo con los splats que yacen debajo de ellas, lo cual genera espacios vacíos cerrados, fuera del alcance de la línea de acción del chorro.

Como se ha mencionado con anterioridad, los procesos de proyección térmica sólo operan en el sitio hacia donde apuntan sus boquillas, lo que éstas no pueden “ver”, no lo recubren tal y como sucede con los pequeños orificios. Es así como el siguiente arribo de las partículas no puede llenar los espacios vacíos adyacentes a partículas sólidas atrapadas. En otros casos, aún en el mismo instante, algunas partículas semifundidas se pueden deformar y densificarse completamente, proveyendo suficiente fluido para llenar cualquier espacio vacío formado alrededor de la pequeña cantidad del núcleo sólido existente. También es posible que partículas parcialmente fundidas actúen de manera similar a partículas sólidas, dejando espacios vacíos atrapados alrededor de sus porciones sólidas.

<sup>11</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 49

El ángulo de deposición o de incidencia del chorro de partículas es otra fuente de porosidad, debido al “ensombrecimiento”. La figura 1.10 representa recubrimientos rociados a ángulos inferiores a 45° medidos a partir del ángulo óptimo: el normal a la superficie. La porosidad decrece cuando el ángulo de incidencia se aproxima a 90°.

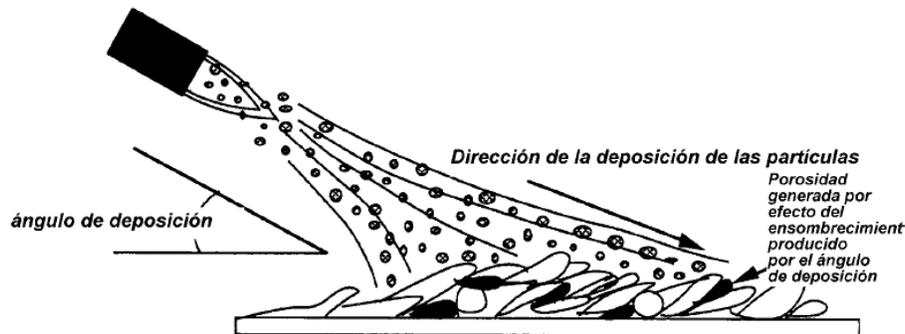


Figura 1.10 Porosidad creada por el resultado de “ensombrecimiento” debido al ángulo.<sup>12</sup>

Los más avanzados sistemas de proyección manejan tolerancias estrechas respecto a este ángulo. Por ejemplo, los recubrimientos proyectados por plasma deben ser rociados a  $\pm 15^\circ$ , mientras que otros procesos de alta energía cinética deben ser rociados  $\pm 30^\circ$ . La figura 1.10 muestra cómo se forman protuberancias en la superficie del recubrimiento las cuales forman intersticios vacíos adyacentes o debajo de éstas. Estas protuberancias generan mayor ensombrecimiento cuando el ángulo de incidencia es mucho menor a 90°. Los dispositivos de sujeción mal colocados, los filetes de radio pequeño y los bordes del sustrato contribuyen a la formación de porosidades locales, tal y como se muestra en la figura 1.11.

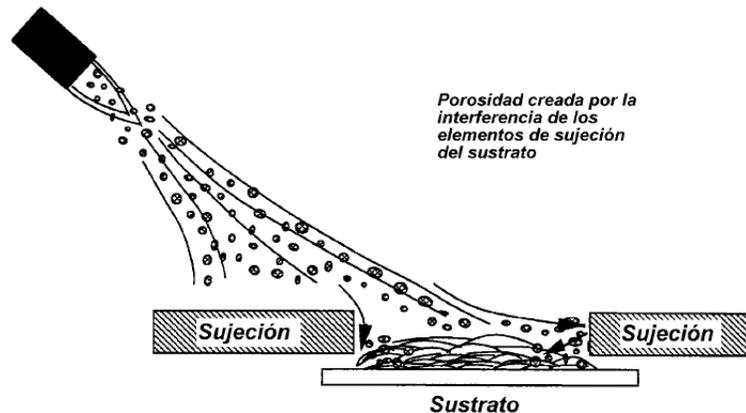


Figura 1.11 Porosidad creada por la interferencia de los dispositivos de sujeción.<sup>13</sup>

En estos casos, las partículas sólidas más frías pueden rebotar con los bordes adyacentes de los dispositivos de sujeción y regresar al área de recubrimiento. Las partículas atrapadas conducen a la formación de alta porosidad localizada. Una notable excepción a esta regla

<sup>12</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 50

<sup>13</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 50

son los procesos de proyección térmica con alta energía cinética, por ejemplo el HVOF. En este caso, aunque la eficiencia de deposición (ED) se reduce tanto como el chorro rociado reduce su ángulo de incidencia, la calidad del recubrimiento se mantiene, aunque el ángulo de incidencia abarque un amplio rango de ángulos en el intervalo 45-90°.

La porosidad también puede ser ocasionada por esfuerzos térmicos que pueden producir un encogimiento localizado del recubrimiento, o por capas de oxidación intersplats las cuales se empujan a ellas mismas durante el enfriamiento. En este caso, las siguientes gotas que impactan no llenan los espacios vacíos, provocando la formación de porosidad. Los óxidos pueden causar porosidad debido al pobre esparcimiento de las partículas durante el alargamiento de los splats, los cuales conducen al levantamiento de los bordes de los splats, ocasionando así la formación de espacios vacíos. Los esfuerzos residuales, ocasionados por el encogimiento o diferencias en el coeficiente de expansión térmica, pueden añadirse a estos efectos locales en los splats o actuar en gran escala, provocando macroagrietamientos o agrietamientos intrasplat al interior del recubrimiento.

Finalmente, una preparación metalográfica influye significativamente en la interpretación de la calidad de un recubrimiento. La naturaleza heterogénea de la mayoría de los recubrimientos hace que su pulido sea muy difícil. El retiro o fractura de las capas duras y las pobremente adheridas secciones de los splats es una fuente de porosidad en muestras metalográficas, tanto en superficies recubiertas maquinadas o no maquinadas.

### *CONTROL.*

El control de la porosidad es una función de la distribución del tamaño de las partículas, el método de manufactura de los polvos, el grado de derretimiento de las gotas rociadas, y de su ángulo de impacto; con esos factores controlados, la porosidad puede ser manejada. El derretimiento de la partícula es controlado por:

- La temperatura del chorro y la distribución de entalpía.
- La transferencia de calor efectiva entre la partícula y el chorro, y las propiedades del gas y/o el chorro.
- El tamaño de la partícula y la distribución del tamaño de éstas.
- La morfología de las partículas.
- Las propiedades térmicas de las partículas.
- El tiempo de permanencia de las partículas.
- Las distribuciones en las trayectorias de las partículas.
- En el caso del proceso por arco eléctrico, el voltaje, la corriente y el flujo del gas atomizador.

Estos factores determinan notablemente el estado fundido de las partículas al momento del impacto y el grado de oxidación de la partícula al momento anterior al impacto de la siguiente partícula, lo cual ha sido discutido con anterioridad, controlando así los niveles de porosidad del recubrimiento final.

### *1.5 PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA.*

Las propiedades de los recubrimientos por proyección térmica se expresan usualmente en términos de:

- Adherencia con el sustrato.
- Dureza.
- Resistencia a la corrosión-oxidación.
- Propiedades térmicas.
- Propiedades eléctricas, tales como la conductividad, resistividad y resistencia dieléctrica.
- Propiedades magneto-ópticas, como la absorbencia y la reflectividad.
- Maquinabilidad.

La importancia relativa de estas propiedades se basa en la función para la que el recubrimiento ha sido diseñado. Las características del recubrimiento tales como la porosidad, la cohesión de los splats y el contenido de óxido, tienen un peso importante en las propiedades descritas.

La adhesión del recubrimiento con el sustrato, y la cohesión entre los splats se ve afectada por:

- Los esfuerzos residuales al interior del recubrimiento.
- Derretimiento y aleación localizada en el contacto entre las superficies de las partículas y entre el sustrato y las partículas colindantes.
- Difusión de especies elementales a través de los límites de cada splat.
- Fuerzas de atracción a nivel atómico.
- Entrelazamiento mecánico.

La resistencia de adhesión con el sustrato medible es gobernada por los esfuerzos residuales en los recubrimientos. Típicamente, y aún cuando la falla del recubrimiento aparenta ocurrir en la intercara entre el sustrato y el recubrimiento, el material residual del recubrimiento se halla adherido al sustrato. Las fallas en la adhesión y la cohesión del recubrimiento se atribuyen usualmente a los esfuerzos al interior de la estructura. La mayoría de las fallas en el recubrimiento ocurren en la intercara recubrimiento-sustrato, debido a que es el lugar donde existen mayores discontinuidades en el sistema del material.

En los lugares donde los materiales son compatibles y las superficies están apropiadamente preparadas, la adhesión entre la primera capa de splats y el sustrato es extraordinaria, debido a los fenómenos listados con anterioridad.

La rugosidad superficial del sustrato es usada generalmente para incrementar el área de contacto de la superficie, lo cual aumenta la posibilidad de que las interacciones favorables mencionadas tengan lugar.

El entrelazamiento mecánico, como se ilustra en la figura 1.12, ha sido visto históricamente como el principal mecanismo de adhesión de los recubrimientos por proyección térmica. El

entrelazamiento mecánico juega un parte importante entre la adhesión y cohesión del recubrimiento cuando la superficie que está siendo recubierta permite al material fundido fluir al interior para llenar un relieve negativo, o los sitios en donde la parte contenga relieves negativos.

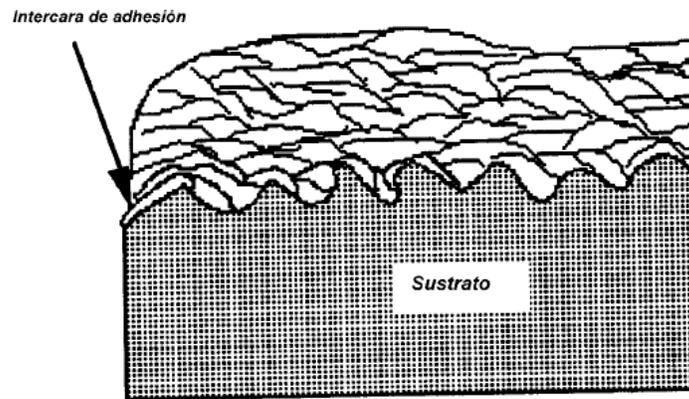


Figura 1.12 Entrelazado de las partículas. <sup>14</sup>

En este caso, la adhesión con el sustrato y las partículas impactadas se estabiliza grandemente mediante el impacto de partículas que fluyen y solidifican alrededor de asperezas de la superficie del sustrato. Dichas asperezas con relieve negativo pueden formarse previamente a través de sandblast u otras técnicas mecánicas de preparación de superficies, o bien, irregularidades superficiales inducidas por el proceso en la nueva superficie del recubrimiento.

Los óxidos, suciedad y/o grasa sobre el sustrato usualmente interfieren en la formación de splats y pueden reducir o anular la adhesión local. El grado de adhesión en el recubrimiento determina su confiabilidad bajo cargas mecánicas o térmicas. En consecuencia, la preparación superficial, la limpieza y la porosidad son pasos previos de gran importancia en la obtención de un recubrimiento por proyección térmica. La adhesión del recubrimiento sigue siendo una de las mayores fuentes de falla en los recubrimientos. Muchas fallas ocurren por pasar por alto el diseño del sustrato, una mala selección de materiales o un diseño inapropiado de las operaciones del proceso.

Después de la deposición de la primera capa del recubrimiento la cual se encuentra en contacto directo con el sustrato, los splats de la siguiente capa se adhieren a partir del impacto de las nuevas gotas sobre los splats ya resolidificadas de la capa anterior. A este hecho se le denomina cohesión. La resistencia general del recubrimiento se determina principalmente por la resistencia de esta cohesión. La resistencia general del recubrimiento también es influenciada por la porosidad generada, las inclusiones de óxido y las partículas embebidas sin fundir.

Las partículas sin fundir que se hallan debajo del área de contacto intersplat, las cuales reducen la cohesión entre las partículas y disminuyen localmente la transferencia de calor,

<sup>14</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 51

conducen a la aparición de zonas no homogéneas en el recubrimiento. Las fallas en la cohesión localizada, ocasionadas por una pobre adhesión, el agrietamiento térmico y un pobre esparcimiento entre partículas, determinan en última instancia la resistencia de la red y las propiedades físicas de un recubrimiento. Aunque los recubrimientos por proyección térmica exhiben una ductilidad y tenacidad limitada, tienen intrínsecamente altas resistencias y frecuentemente exhiben una alta dureza.

La adherencia se mide típicamente de acuerdo a la norma ASTM C 633-01 (“Método de prueba estándar para la adhesión y cohesión”). Los adhesivos estructurales están limitados a aproximadamente 83 MPa (aprox. 12 ksi). Se han medido resistencias de adhesión en recubrimientos por proyección térmica en el rango de 7 – 83 MPa.

El comportamiento del recubrimiento es, en última instancia, el promedio de todos los rasgos locales y sus propiedades. La porosidad, las inclusiones de óxido, el contacto de cohesión entre splats, y todo lo anterior en conjunto, afectan a las macro-propiedades del recubrimiento, definiendo así el qué tan adecuado es el recubrimiento contenido para una aplicación dada.

## *1.6 APLICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA*

La flexibilidad de los procesos de proyección térmica ofrece la posibilidad de aplicar casi cualquier material como recubrimiento sobre casi cualquier sustrato, lo cual genera una amplia gama de aplicaciones con sus respectivas propiedades, ya sea una sola o una combinación de estas propiedades.

Dichas propiedades y los materiales empleados frecuentemente para la elaboración de los diversos recubrimientos son:

- Antidesgaste.
- Aislamiento térmico.
- Resistencia a la corrosión.
- Recubrimientos deliberadamente desgastables y recubrimientos resistentes a la abrasión.
- Recubrimientos eléctricamente conductivos y recubrimientos eléctricamente resistivos/aislantes.
- Recubrimientos para la restauración dimensional.
- Recubrimientos para uso médico.
- Recubrimientos poliméricos.

### *1.6.1 RECUBRIMIENTOS ANTIDESGASTES.*

Los RPT han sido usados para enfrentar varios mecanismos de desgaste incluyendo la abrasión, la erosión o la cavitación. En la figura 1.13 se muestra un recubrimiento antidesgaste de carburo aplicado con equipo HVOF sobre los bordes de una propela de barco para combatir los efectos de la cavitación, debido a que la proyección térmica puede depositar materiales no convencionales, más de un factor de desgaste puede ser atacado por

un solo recubrimiento, a partir de que varias propiedades físicas pueden ser integradas en dicho recubrimiento. Por ejemplo, los cermetes pueden ser usados para combinar la alta resistencia al desgaste con la baja conductividad térmica.



Figura 1.13 Propela de barco recubierta con equipo HVOF.<sup>15</sup>

Materiales antiadherentes y materiales con bajo coeficiente de fricción pueden ser combinados con recubrimientos de alta dureza. Materiales autolubricantes también pueden ser depositados. Las durezas de los recubrimientos pueden ser prediseñadas en el rango de 20 a 70 HRC. Los óxidos y los carburos son materiales antidesgaste comunes, teniendo a los óxidos de cromo y los cermetes de carburo de tungsteno-cobalto (WC/Co) como los 2 recubrimientos más comunes para éste fin.

### 1.6.2 AISLAMIENTO TÉRMICO.

Los recubrimientos para barreras térmicas están hechos usualmente de zirconia de baja conductividad térmica, los cuales se depositan para reducir la conducción de calor hacia el sustrato. La figura 1.14 muestra una barrera térmica de zirconia estabilizada con itrio rociada con equipo de plasma para proteger un álabe de turbina.



Figura 1.14 Barrera térmica de zirconia estabilizada con itrio.<sup>16</sup>

Estos recubrimientos también pueden reducir el calor perdido, los efectos térmicos transitorios, y la corrosión/oxidación a alta temperatura mediante el mantenimiento del

<sup>15</sup> Fuente: [www.hoganasthermalspray.com/category.html/flame-spray](http://www.hoganasthermalspray.com/category.html/flame-spray)

<sup>16</sup> Alabe de Turbina. Fuente: [www.siemens.com](http://www.siemens.com)

sustrato a una temperatura inferior. Los procesos por proyección térmica pueden introducir al sustrato niveles controlados de porosidad y micro-agrietamiento, lo cual tiende a realzar la capacidad aislante del recubrimiento e incrementar su resistencia al choque térmico. El material más comúnmente usado para este fin es la zirconia parcialmente estabilizada.

### 1.6.3 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.

La protección anticorrosiva es usualmente obtenida con materiales más nobles que el sustrato, cerámicos químicamente inertes o con polímeros, todos los cuales pueden ser proyectados térmicamente sobre partes expuestas en servicio a la corrosión atmosférica, ambiental, ácida o cáustica. En la figura 1.15 se muestra un elemento estructural de acero siendo recubierto mediante un equipo de arco eléctrico.



Figura 1.15 Elemento estructural de acero siendo recubierto mediante un equipo de arco eléctrico.<sup>17</sup>

La porosidad es muy nociva para esta clase de recubrimientos. Las porosidades interconectadas pueden estropear la función anticorrosiva del recubrimiento. Los recubrimientos obtenidos mediante procesos de proyección térmica de alta energía son especialmente adecuados para esta clase de aplicaciones debido a que exhiben una porosidad baja (usualmente menor a 1%) y poros aislados entre sí. Los materiales más comunes usados para la resistencia a la corrosión incluyen al zinc, al aluminio puro, las aleaciones base níquel y las aleaciones cobre-níquel.

### 1.6.4 RECUBRIMIENTOS INTENCIONALMENTE DESGASTABLES Y RESISTENTES A LA ABRASIÓN.

Las figuras 1.16 a) y b) muestran, a) delaminación y b) desgaste de un sello níquel-grafito y en las figuras c) y d) muestran, c) un sello níquel-grafito y d) níquel-cromo. Estos sellos sirven para reducir al máximo el espaciamiento entre la carcasa y los rodetes de una etapa de compresión en una turbina de gas.

---

<sup>17</sup> Equipo de arco eléctrico. Fuente: [www.flamespray.com.mx](http://www.flamespray.com.mx)

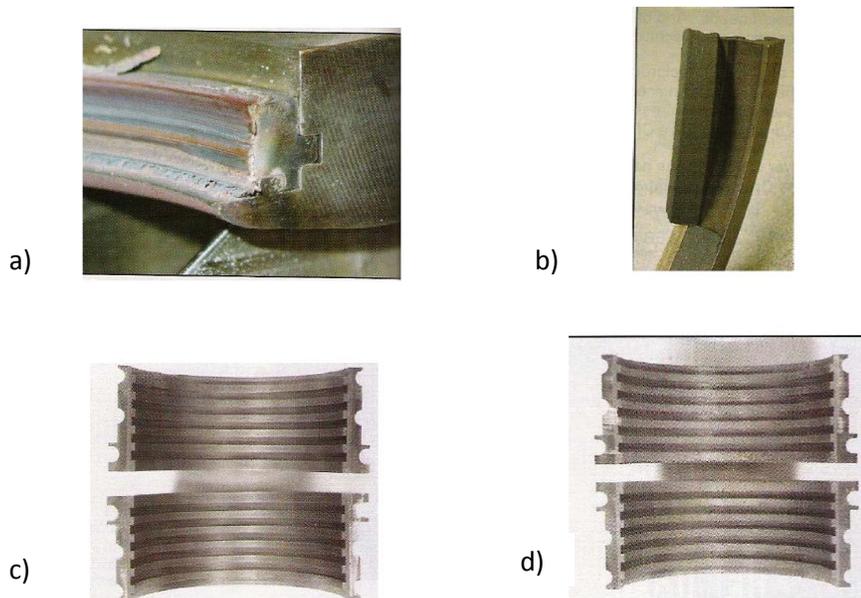


Figura 1.16 a) delaminación y b) desgaste de un sello níquel-grafito; c) sello níquel-grafito, d) sello níquel-cromo.<sup>18</sup>

Los recubrimientos intencionalmente desgastables son aplicados muy frecuentemente en turbinas de gas para sellar el espacio entre la carcasa y los filos de contacto de los álabes.

Dichos filos están diseñados para realizar cortes en el relativamente suave recubrimiento de la carcasa. El filo y el sello laberíntico formado aumentan el desempeño de la turbina a través de evitar que los gases se fuguen en el espacio entre el rodete de la turbina y su carcasa. Estos recubrimientos están hechos usualmente de varias combinaciones de materiales duro-suave: níquel –bentonita o aluminio-poliéster.

Los recubrimientos resistentes a la abrasión tales como los cerámicos y los carburos, pueden ser aplicados a los filos directamente o formando una matriz para reducir el desgaste entre éstos y el recubrimiento desgastable de la carcasa.

### 1.6.5 RECUBRIMIENTOS ELÉCTRICAMENTE CONDUCTORES Y AISLANTES.

La proyección térmica se usa frecuentemente para crear conductores o contactos, conexiones eléctricas, elementos de calentamiento, escudos contra interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia, entre otros usos eléctricos.

Los materiales conductores incluyen a la plata, el cobre, el aluminio, las aleaciones de estaño, los bronce aleados. Las conductividades típicas de esos materiales al ser proyectados térmicamente van del 40 al 90% de la propia de esos materiales al no ser rociados, dependiendo del método de proyección térmica empleado. El bronce al silicio, zinc y babbitt se usan como escudos contra interferencias para proteger a los dispositivos

<sup>18</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 132

electrónicos sensibles a las interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia. Entre los conductores comúnmente empleados para este fin figuran el titanato de aluminio, el titanato de bario, el molibdeno disilicídico y otros compuestos cerámicos. La proyección térmica se ha visto limitada a materiales que presentan resistencia eléctrica cero en el rango de bajas temperaturas a temperaturas intermedias de 77 K (-196.15°C). Por ejemplo el 1-2-3 YbaCuO, el Cu/Nb<sub>3</sub>Sn y el Nb<sub>3</sub>Sn.

Los materiales aislantes más comunes usados en proyección térmica son los compuestos de alúmina, los cuales incluyen a la alúmina pura, la alúmina-óxido de titanio, o el silicato de aluminio. Estos recubrimientos pueden ser aplicados en dispositivos de comunicaciones e instrumentos quirúrgicos.

#### 1.6.6 RECUBRIMIENTOS PARA LA RESTAURACIÓN DIMENSIONAL.

La proyección térmica tuvo sus inicios en aplicaciones para restaurar las superficies desgastadas de ejes y rodillos. El hierro y el acero son los materiales típicamente empleados para realizar dichas restauraciones. Mediante el uso de técnicas de proyección térmica por arco eléctrico se pueden obtener recubrimientos de varios milímetros de espesor.

Una aplicación poco usual es la reparación de revestimientos para aeronaves usando aluminio puro proyectado mediante técnicas de arco de plasma. En la cual se rellenan rayones o abolladuras sobre la superficie de paneles o piezas estructurales. Las figuras 1.17, 1.18, 1.19 y 1.20 muestran la secuencia de la restauración dimensional del eje de la propela de un barco.

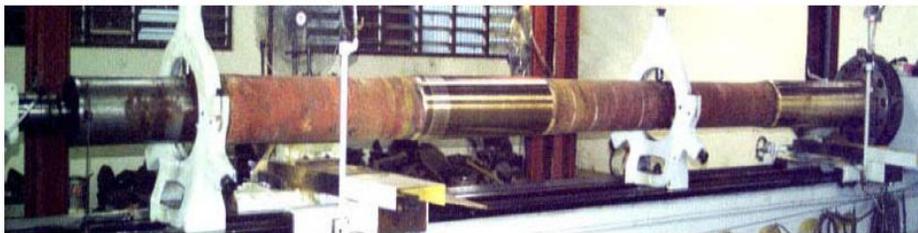


Figura 1.17 Eje de la propela de un barco. Se restauran las zonas en donde se montan los rodamientos.



Figura 1.18 Se rocía una aleación de aluminio-bronce mediante equipo de arco eléctrico en la zona a restaurar.



Figura 1.19 Recubrimiento de aluminio-bronce obtenido después de rociar.



Figura 1.20 Recubrimiento maquinado. Eje listo para volver a prestar servicio.<sup>19</sup>

Estas simples pero efectivas técnicas de reparación evitan en muchas ocasiones el fuerte gasto e inversión de tiempo en desarmar estructuras o mecanismos para reemplazar componentes superficialmente dañados.

#### 1.6.7 RECUBRIMIENTOS PARA USO MÉDICO.

La figura 1.21 muestra una prótesis de cadera, cuyos sustratos están hechos con Ti-6Al-4V recubiertos con titanio de pureza comercial (CP-Ti) rociado mediante arco eléctrico protegido con argón.



Figura 1.21 Prótesis de cadera.<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 142

<sup>20</sup> Prótesis de cadera. Fuente: <http://redalyc.uaemex.mx/>

Los recubrimientos médicos se dividen en dos grandes categorías: bioactivos y biocompatibles. Ambos tipos de recubrimientos se usan en prótesis para implante. Para generar recubrimientos biocompatibles se emplea típicamente titanio poroso con la finalidad de recubrir aleaciones de titanio; el nuevo tejido óseo crece dentro de la porosidad del recubrimiento asegurando así el implante. Los recubrimientos bioactivos están hechos generalmente de algunas formas de fosfato de calcio, incluyendo el fosfato tricálcico y la hidroxiapatita. Esos recubrimientos emulan las características del hueso natural para que el nuevo tejido óseo crezca sobre la superficie y con el tiempo reabsorba el recubrimiento.

Ambos tipos de recubrimientos son pensados para acelerar la recuperación del paciente y extender el mayor tiempo posible la vida útil del implante. Los implantes dentales y otros dispositivos ortopédicos también son otra aplicación de esta clase de recubrimientos.

#### 1.6.8 RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS.

Muchos polímeros pueden ser proyectados térmicamente para ser usados como protección contra el ataque químico, la corrosión o la abrasión. A diferencia de los recubrimientos por proyección térmica inorgánicos, muchos recubrimientos por proyección poliméricos exhiben propiedades iguales o mejores que sus contrapartes por moldeo o por fundición.

Los polímeros con una baja temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) tales como el cloruro de polivinilo o PVC, el acetato de vinilileno y el nylon, son los que ofrecen mayor facilidad para ser empleados como recubrimientos por proyección térmica.

## CAPÍTULO 2. PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA.

### 2.1 PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA.

#### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.

La proyección térmica por flama convencional fue el primer proceso de proyección térmica desarrollado, al rededor del año 1910, y aun es de uso común. Las antorchas modernas han cambiado poco a partir de los años 50`s. Los procesos por flama emplean energía química de los gases para generar calor. Las antorchas de oxiacetileno son las más comunes, usando acetileno en combinación de oxígeno para generar altas temperaturas de combustión, en comparación con las de oxígeno combinado con propano o propileno. La figura 2.1 muestra el armado de los componentes del equipo de proyección térmica.

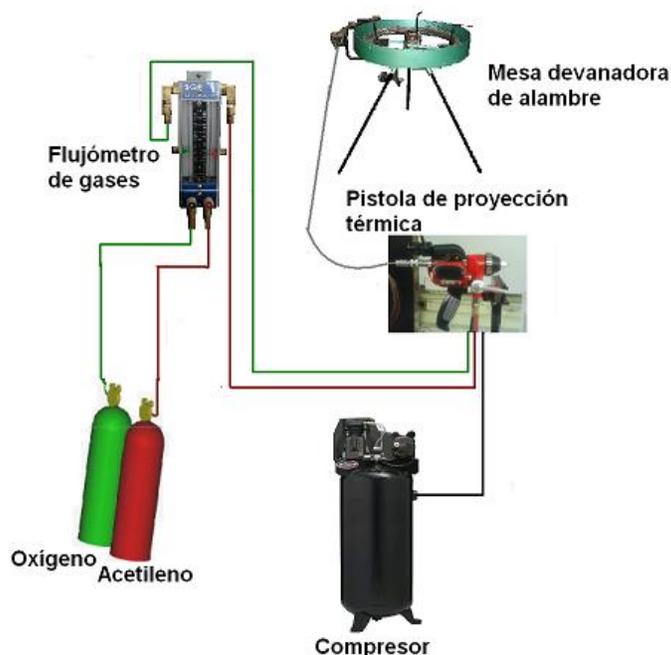


Figura 2.1 Armado del equipo de proyección térmica por alambre. <sup>21</sup>

En las pistolas convencionales, un chorro de combustible y oxígeno hace combustión exteriormente al extremo frontal de la boquilla de la pistola. Las pistolas consisten en un arreglo de secciones de distribución de gases a través de la boquilla y orificios de mezclado de gases al final de dicha boquilla. En algunos diseños, un flujo de aire restringe a la flama, dicho flujo parte de un arreglo concéntrico de agujeros en la punta de la boquilla de la pistola, la restricción de la flama afecta a los gases en plena expansión, generando de esta forma una zona de combustión con temperaturas muy elevadas. Las boquillas también le dan forma al patrón de la flama. En los procesos que se alimentan por alambre o barra, se emplea un anillo coaxial a la barra por el cual fluye un chorro de aire, el cual atomiza posteriormente a las partículas fundidas del material de alimentación en la punta de la barra

<sup>21</sup> Laboratorio de proyección térmica, Facultad de Ingeniería, UNAM

o del alambre. Dicha barra o alambre es alimentado mecánicamente al sistema. Una gran ventaja de los alambres y barras sobre los polvos consisten en que el grado de derretimiento del material es significativamente mayor, lo cual produce recubrimientos más densos. La eficiencia promedio del proceso es de 60%. Adicionalmente, el atomizador produce gotas más finas, lo cual repercute en la obtención de recubrimientos más finos y lisos. La figura 2.2 muestra un sistema alimentado con polvos, Powder Flame Spray<sup>22</sup>

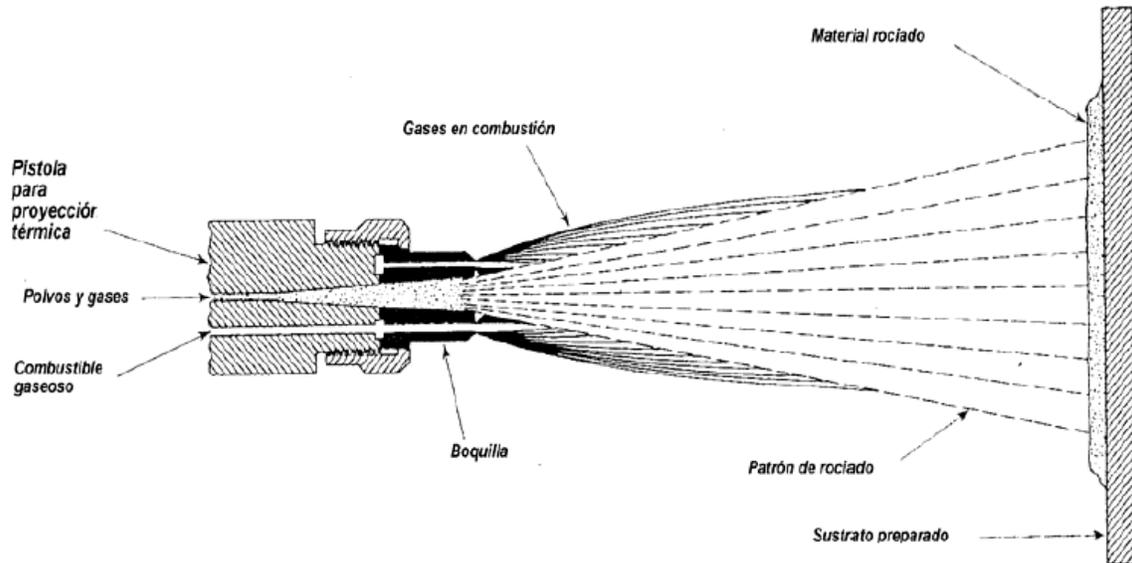


Figura 2.2 Sistema alimentado con polvos (Powder Flame Spray).<sup>23</sup>

La figura 2.3 muestra un sistema alimentado con barra o alambre, Wire Flame Spray<sup>24</sup>

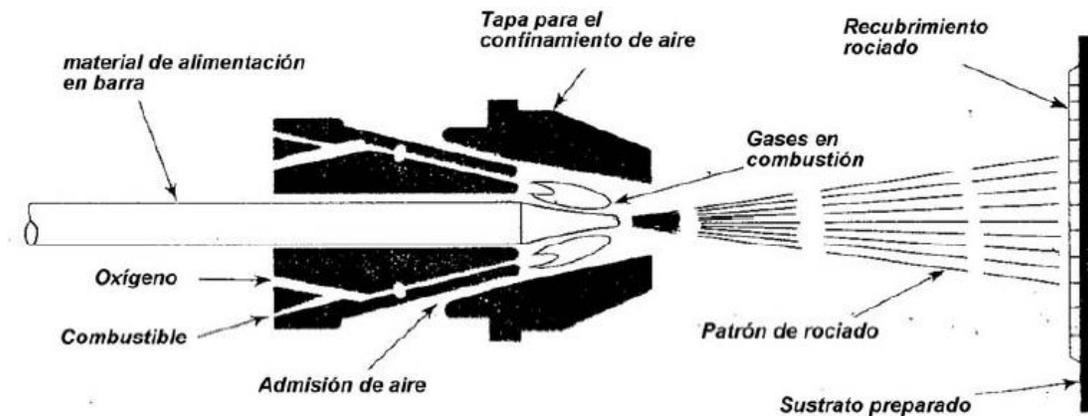


Figura 2.3 Sistema alimentado con barra o alambre (Wire Flame Spray).<sup>25</sup>

<sup>22</sup> SULZER METCO INC. Distribuido por: FLAME SPRAY S.A. de C.V.

<sup>23</sup> Manual Powder Flame Spray.

<sup>24</sup> SULZER METCO INC. Distribuido por: FLAME SPRAY S.A. de C.V.

<sup>25</sup> Manual Wire Jet Flame Spray.

La figura 2.4 muestra dos pistolas de proyección térmica, con alimentación de polvos y alambre respectivamente.



Figura 2.4 Pistolas de proyección térmica por polvo y alambre.<sup>26</sup>

En los procesos por flama, la relación combustible – oxígeno y las tasas de flujo total de gas se ajustan para producir las condiciones térmicas de salida deseadas. Las velocidades del chorro de gas se encuentran típicamente debajo de los 100 m/s, generando velocidades de partícula antes del impacto por encima de los 80 m/s. La temperatura del chorro en flama abierta se encuentra generalmente por encima de los 2600 °C y se controla por la temperatura de combustión de la mezcla combustible – oxígeno (relación de combustión). Al ajustar la relación de combustión en las proximidades de la mezcla estequiométrica (es decir, en la zona de mezcla rica o en la zona de mezcla pobre) la flama puede enfriarse. Este hecho se debe a que dicho ajuste hace a la flama reductora u oxidante, de acuerdo al material a proyectar y/o a la aplicación. Las flamas que se emplean son en general reductoras (mezcla rica en combustible) para la mayoría de los materiales, con el fin de minimizar los óxidos. Generalmente la mayoría de las pistolas se diseñan para tomar el oxígeno faltante a partir de los chorros de aire propelente o de enfriamiento. La proyección térmica por flama es capaz de depositar una extensa gama de materiales, desde polímeros hasta cerámicos y metales refractarios.

### 2.1.2 EQUIPO Y COMPONENTES.

Los polvos alimentan a las pistolas mediante una de las dos formas: por gases de arrastre o por gravedad. Los dispositivos de alimentación por gravedad consisten en depósitos de polvos ubicados usualmente encima de la pistola. La taza de alimentación se fija mediante una válvula con la cual se introduce el polvo a la pistola, en donde es aspirado por los gases fluyendo a través de la pistola. Los equipos que utilizan gases de arrastre utilizan alimentadores de polvos externos a estos. Dichos alimentadores utilizan una corriente de gas de arrastre (usualmente aire o nitrógeno) para transportar los polvos hacia la pistola a través de una manguera. Los dispositivos alimentados con alambre utilizan turbinas de aire montadas dentro de la pistola las cuales impulsan a los rodillos alimentadores para mover dichos alambres o barras en el interior de la pistola.

<sup>26</sup> Pistolas de proyección térmica alimentadas por polvo y alambre. Equipo utilizado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Los componentes fundamentales de un sistema típico de proyección térmica por flama son:

- Tanques de gases.
- Suministro de aire mediante compresor.
- Mangueras para los gases.
- Reguladores para el oxígeno, aire y combustible.
- Válvulas de no retorno en los reguladores y en la pistola.
- La pistola de proyección térmica compuesta por el cuerpo de ésta, su boquilla y su anillo para la salida del aire restrictor de flama.
- Sistema de alimentación del material a proyectar.

### 2.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA.

Los procesos de proyección térmica por flama generan normalmente densidades en los recubrimientos del orden del 85% al 98%, dependiendo del material y la técnica en particular. Esas bajas densidades son resultado de las bajas velocidades y temperaturas en el chorro obtenidas mediante estos procesos. La figura 2.5 muestra algunas microestructuras típicas de recubrimientos de metal NiCrBSiC/Colmonoy 72 rociado y fundido (izquierda), de cerámicos (centro) y polímeros (derecha), obtenidos con procesos por flama. Nótese la estructura con splats gruesos y la alta porosidad obtenida con estos procesos con relación a otros procesos de proyección térmica.

Las inclusiones de óxido son resultado del carácter oxidante de los procesos de proyección térmica, los cuales permiten un alto grado de interacción entre la atmósfera y las gotas de material fundido. La estructura del recubrimiento polimérico muestra una densa y bien adherida capa superficial. Esta estructura es resultado de una fusión posterior o coincidente con la deposición.

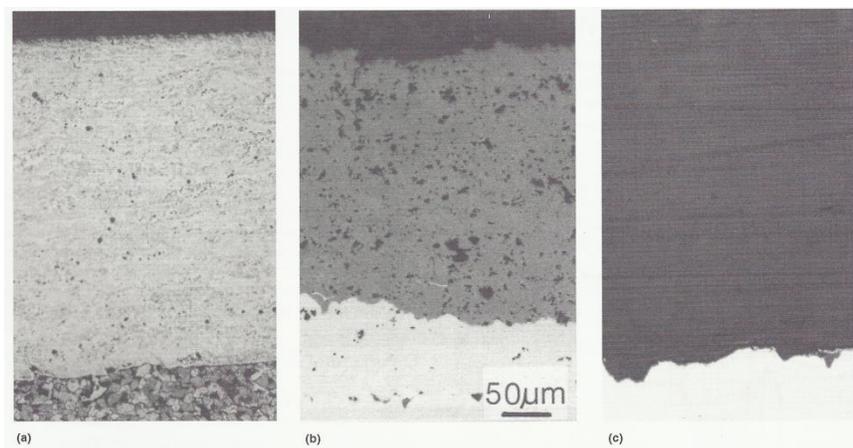


Figura 2.5 Estructura típica del proceso de proyección térmica.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 56

## 2.2 PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR DEPOSICIÓN.

### 2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO Y EQUIPO.

La D-Gun®<sup>28</sup> genera un chorro con alta energía térmica y cinética mediante la confinación de la detonación de la combustión en una cámara en la cual los polvos son introducidos.

Este diseño produce una gran transferencia de calor y momentum a las partículas de polvos, fue el primero y más extensamente conocido proceso de proyección térmica por detonación

En la proyección térmica por detonación, una mezcla explosiva de combustible, oxígeno y polvos es introducida en un tubo largo (cañón), haciendo ignición por la chispa de una bujía. La onda de presión resultante de dicha detonación calienta y acelera las partículas de polvo contenidas en la mezcla, las cuales viajan a través del cañón enfriado por agua de la pistola para finalmente hacer impacto sobre un sustrato. Se emplea nitrógeno para purgar el cañón entre detonaciones sucesivas. La figura 2.6 muestra este equipo.

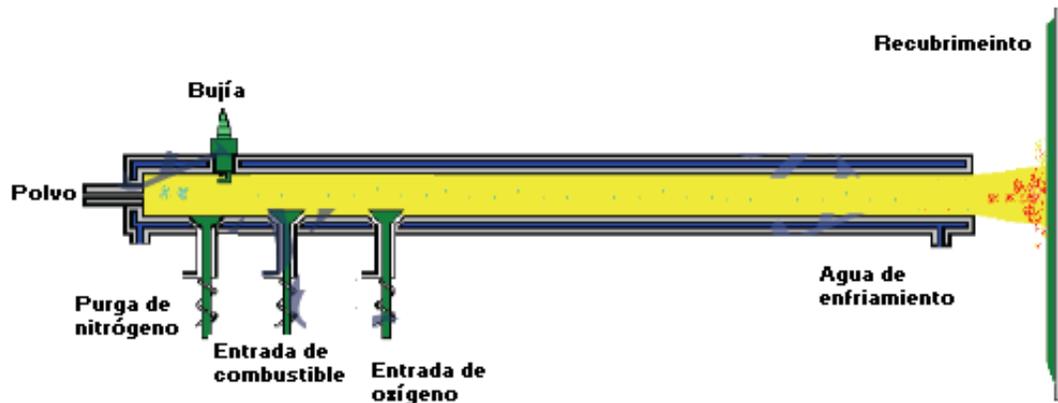


Figura 2.6 Pistola de proyección térmica por detonación.<sup>29</sup>

Los procesos de proyección térmica por detonación trabajan a temperaturas y tiempos de permanencia de las partículas mayores que los procesos de proyección térmica por flama convencionales. La frecuencia y los niveles de ruido (145+ dBA) asociados con los procesos por detonación obligan a que se realicen en lugares con aislamiento acústico. Con este proceso se generan altas velocidades en las partículas, generalmente mayores a 800 m/s. Dichas velocidades aumentan la deformación de las partículas incrementando de esta forma de adhesión entre el sustrato y el recubrimiento, eliminando de este modo una gran parte de la porosidad encontrada típicamente en los procesos convencionales de proyección térmica por flama.

<sup>28</sup> Desarrollada por Union Carbide, hoy Praxair Surface Technologies, Inc. Indianápolis, IN

<sup>29</sup> Diagrama de pistola por detonación. Fuente: <http://www.asiantss.com>

### 2.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO OBTENIDO POR DETONACION.

La figura 2.7 muestra la microestructura típica de un recubrimiento de WC/Co (cermet y óxido) producidos por una D-Gun®.

a)



b)

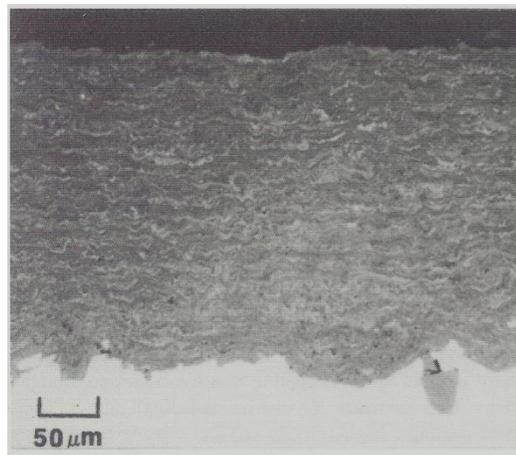


Figura 2.7 Microestructura típica de un recubrimiento de  
a) WC/Co (cermet y óxido) y b)  $Al_2O_3/TiO_2$  producidos por una D-Gun®.<sup>30</sup>

Nótese que los splats obtenidos son más finos y alargados que los producidos por los procesos convencionales de proyección térmica por flama. Se nota también una presencia menor de óxidos. Lo anterior se debe a que las finas partículas han sido protegidas por el ambiente creado por los gases en combustión a lo largo del cañón y a un tiempo de permanencia pequeño. Este ambiente previene a las partículas de la oxidación típica en los procesos convencionales de proyección térmica por flama debida a la atmósfera abierta durante el calentamiento y la aceleración de las partículas.

<sup>30</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 57

### 2.2.3 D-Gun® CONTRA OTROS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA.

Aunque otros procesos, como el HVOF o los de plasma de alta energía, son capaces de generar recubrimientos comparables en calidad con los obtenidos por los procesos por detonación, la D-Gun® ha sido el estándar de comparación desde finales de los años 1950s.

Cuando se comparan los recubrimientos de WC/Co obtenidos por plasma con los obtenidos por detonación, se nota que estos últimos contienen un mayor grado de carburos retenidos.

Esta alta retención de carburos se debe a la atmósfera reductora de la combustión creada al interior del cañón y a un corto tiempo de permanencia. Los recubrimientos obtenidos por proyección térmica por detonación son los más densos y duros de todos los recubrimientos obtenidos por proyección térmica. Por esta razón, muchos recubrimientos antidesgaste utilizados en motores de aviones comerciales se especifican para un proceso con la D-Gun®.

### 2.3 PROYECCIÓN TÉRMICA POR COMBUSTIÓN DE ALTA VELOCIDAD (HIGH-VELOCITY OXIFUEL SPRAY “HVOF”).

#### 2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.

El proceso HVOF, ver figura 2.8, se volvió comercialmente significativo en el inicio de los 1980s cuando el sistema JetKote<sup>31</sup> fue introducido por James Browning. El HVOF es similar en algunos aspectos a la proyección por detonación. Al igual que en la proyección por detonación, el HVOF tiene una combustión interna confinada, sin embargo, opera en un estado continuo, no intermitente a diferencia de la D-Gun®.



Figura 2.8 Pistolas de proyección térmica por combustión de alta velocidad.<sup>32</sup>

En principio, un alto volumen de gases combustibles son alimentados al interior de la cámara de combustión, en la cual se extienden de 8 a 30 cm. (3 a 12 pulgadas) a lo largo del cañón del dispositivo a través del cual los gases en combustión abandonan el dispositivo.

<sup>31</sup> Inventado en 1958 por Union Carbide, hoy Praxair Surface Technologies, Inc.

<sup>32</sup> Pistolas HVOF. Fuente: [http://primaloy.com/praxair\\_hp.htm](http://primaloy.com/praxair_hp.htm)

La alta compresión y temperatura de combustión de los gases crean un flujo de alta velocidad del orden de 1525 a 1825 m/s a la salida del cañón. Entre los combustibles empleados están el hidrógeno, el propileno, el propano, el acetileno y el keroseno. También se emplean gases de marca registrada como el MAPP®<sup>33</sup> o el Apache®<sup>34</sup>.

Es importante señalar que existen dos clases de dispositivos para proyección térmica por combustión de alta velocidad, diferenciados de acuerdo a la presión en su cámara de combustión. La primera clase, que se ajusta mejor al término “de alta velocidad”, se caracteriza por presiones en su cámara que exceden los 241 kPa (35 psi) y con entradas de energía nominales de 527 MJ (500,000 Btu). La segunda clase, que podría identificarse mejor con el término de “hipervelocidad”, operan nominalmente a presiones de 620 a 827 kPa (90 a 120 psi) con aproximadamente 1 GJ (1 millón de Btu) de energía de entrada, en los que el combustible típico es el keroseno. Las pistolas que emplean keroseno como combustible utilizan aire u oxígeno para mantener la combustión.

Las pistolas HVOF tienen cámaras enfriadas por aire o agua en donde la mezcla combustible-oxígeno hace combustión bajo presión y el chorro o flama acelerada resultante se encauza mediante un cañón o tubo largo. Los polvos alimentan a la boquilla al final del cañón mediante un chorro de gas de arrastre para inyectarse en el chorro de alta velocidad creado por los gases en combustión. La figura 2.9 ilustra los componentes básicos de un diseño de combustión interna en un proceso HVOF: Enfriador por agua, inyección de polvos y una boquilla (tobera) para producir una expansión supersónica de los gases en combustión. En este diseño, la eficiencia y la transferencia de calor a la partícula aumentan de la mano con el tiempo de permanencia.

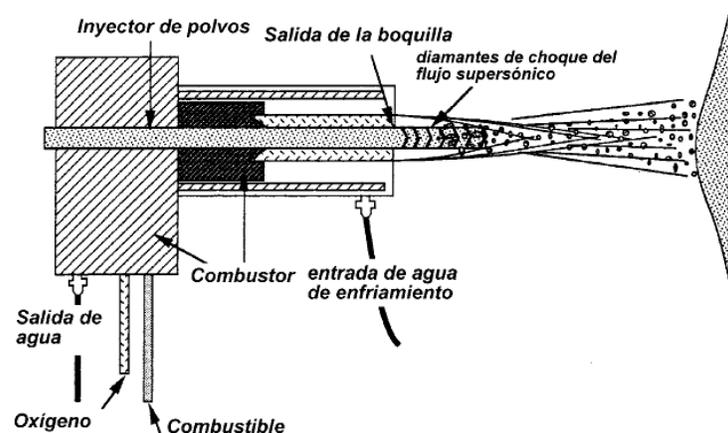


Figura 2.9 Características de pistola de proyección a alta velocidad.<sup>35</sup>

La alta velocidad de la partícula generada por el HVOF es mucho mayor que la obtenida por métodos convencionales de proyección térmica por flama, lo cual repercute en un incremento en la densidad y adhesión del recubrimiento formado. La temperatura promedio en la partícula es menor en HVOF comparada con la obtenida por proyección térmica por

<sup>33</sup> Mezcla de propano y metilacetileno-propadieno, Dow Chemical Compan Midland, Michigan.

<sup>34</sup> Compressed Natural Gas (CNG), Apache Corporation, Houston, Texas.

<sup>35</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 57

plasma, lo cual reduce el derretimiento y la oxidación por alta temperatura. A pesar de lo anterior, las altas densidades en los recubrimientos se deben a las altas velocidades desarrolladas por las partículas, las cuales se deforman aunque no se encuentren bien derretidas. Durante el impacto se genera cierto calentamiento debido a la conversión de la energía cinética en energía térmica, lo cual también contribuye a la generación de recubrimientos densos.

Los procesos HVOF se usan en general para obtener recubrimientos densos y duros de Cermets tales como el WC/Co o el Cr<sub>2</sub> C<sub>3</sub>/NiCr. Sin embargo, se han encontrado muchos usos para los recubrimientos metálicos proyectados por HVOF. Los recubrimientos de (M)CrAlY están siendo aplicados hoy en día en álabes para turbinas de aviación mediante el proceso HVOF con keroseno como combustible.

### 2.3.2 EQUIPO Y COMPONENTES.

Además de la pistola misma, el equipo para HVOF es similar a aquél usado en los procesos convencionales de proyección térmica por flama. Sin embargo, debido a que los equipos HVOF trabajan mediante combustión interna, un sistema de enfriamiento por agua debe ser añadido a la lista de equipos empleados.

Los componentes de un sistema HVOF incluyen:

Circuitos de tubería para el gas de arrastre de los polvos, para el combustible y para el oxígeno, mangueras resistentes a la alta presión de los gases, reguladores para altos flujos de oxígeno y combustible; controles para los altos flujos de gases; reguladores y válvulas anti-retorno.

Una pistola para HVOF consistente en el cuerpo, la cámara de combustión, el inyector de polvos, el cañón y la boquilla (tobera para flujo supersónico).

- Circuitos para enfriamiento con agua o aire.
- Alimentador de polvos de alta presión.
- Consola de purgado y dispositivo de seguridad.

Las pistolas que emplean keroseno como combustible requieren controles adicionales tales como bombas para combustible líquido y, en algunos diseños, bombas para el manejo de altos volúmenes de aire con la finalidad de mantener la combustión y/o alimentar al sistema de enfriamiento.

Existen varias diferencias importantes entre los procesos HVOF y los procesos convencionales por flama. La necesidad de circuitos de enfriamiento es la más obvia. La alta entalpía de las pistolas HVOF produce altos esfuerzos térmicos y oxidación en los componentes de la pistola, particularmente en la cámara de combustión y en la boquilla. Un apropiado diseño y selección en los materiales de dichos componentes es necesario para prevenir que el agua de enfriamiento hierva en el interior de la pistola. Los materiales de la cámara de combustión necesitan ser resistentes a la oxidación, particularmente en los dispositivos alimentados por keroseno. Las boquillas están hechas normalmente de cobre o aleaciones de cobre de alta conductividad térmica libre de oxígeno (OFHC: Oxygen-Free High Conductivity).

El gasto de gas es mucho mayor en HVOF que en procesos convencionales por flama. En HVOF de baja presión, los flujos de hidrocarburos combustibles son nominalmente de 66 litros estándar por minuto (standar liters per minute “sLm”), con flujos de oxígeno nominales de 283 sLm. Los gastos de flujo de hidrógeno son nominalmente de 660 a 850 sLm. En los sistemas de alta presión, el keroseno se alimenta nominalmente de 23 a 26 L/h, con oxígeno nominal de 944 sLm o aire a 4.2 m<sup>3</sup>/min. Los flujos de gas de alta velocidad al interior de las largas boquillas, aceleran las partículas de polvo a velocidades mucho más cercanas a las velocidades de los gases de salida en comparación a los procesos convencionales por flama.

Los niveles de ruido para los sistemas HVOF de baja presión son 125 dBA (típicos en los procesos de plasma de alta energía), mientras que para los sistemas HVOF de alta presión es de 133 dBA (siendo la pistola alimentada con keroseno la más notable).

### 2.3.3 *CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO.*

Las propiedades del recubrimiento resultante del HVOF fueron reportadas para ser comparadas con aquellas del recubrimiento de la D-Gun®, particularmente para recubrimientos de carburos y óxidos, la densidad del recubrimiento proyectado por el HVOF, adhesión y contenidos de óxido también se comparan favorablemente con la alta energía de los recubrimientos proyectados por plasma. La adherencia del recubrimiento por HVOF usualmente excede la norma ASTM C 633 (Método para la prueba estándar para adhesión o cohesión), la cual está limitada por el adhesivo a más o menos 83 MPa. (Alrededor de 12ksi).

La porosidad es típicamente reportada como menos de 1%. Análisis de composición de recubrimientos de WC/Co en HVOF muestran que, comparados con la proyección por plasma, solo una pequeña cantidad de WC se descompone (en W<sub>2</sub>C), preservando los altos valores intrínsecos de dureza del material.

La eficiencia de deposición (ED) de las pistolas en HVOF que usan keroseno como combustible es mucho más baja que las convencionales. La ED para pistolas convencionales está en el rango de 50 a 70% y de 35 a 50% para las que utilizan keroseno. Al parecer, la porción más gruesa de la distribución del tamaño de la partícula en el material de alimentación no forma parte del recubrimiento. Además, a partir de las microestructuras y las ED obtenidas, es posible que estas partículas grandes “granallen” (que no se adhieran y solo reboten) al recubrimiento en formación, lo cual ayuda a generar esfuerzos residuales de compresión en el recubrimiento final.

Las figuras 2.10 a), b) y c) muestran algunos ejemplos de las microestructuras típicas en los recubrimientos obtenidos mediante HVOF. De las cuales, la a): níquel, b): alúmina y c): WC/Co, se caracterizan por la dispersión de finas partículas de óxidos y la formación de splats densos y finos. La figura c) muestra una alta retención de carburos.

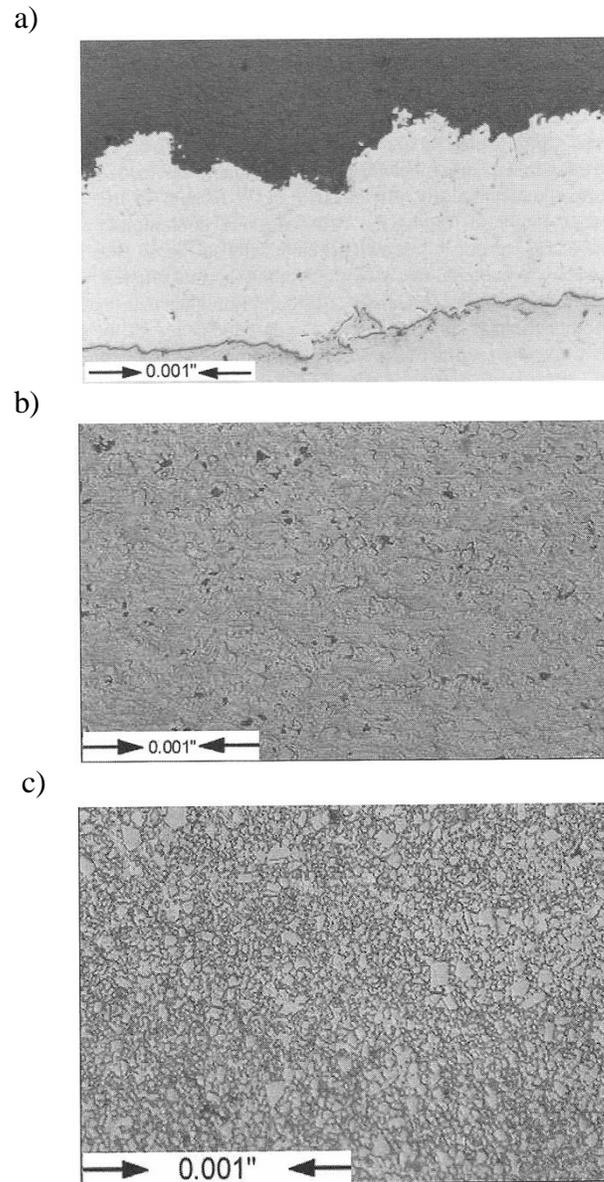


Figura 2.10 Ejemplos de las microestructuras típicas en los recubrimientos obtenidos mediante HVOF: (a) Níquel. (b) Alumina. (c) WC/Co.<sup>36</sup>

## 2.4 PROYECCIÓN POR ARCO ELÉCTRICO.

### 2.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.

A diferencia de otros procesos de proyección térmica, los cuales indirectamente calientan las partículas usando chorros de gas caliente, los procesos de proyección por arco eléctrico, ver figura 2.11, usan un arco eléctrico de corriente directa, cerrando entre dos electrodos de

<sup>36</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 59

alambre consumible para efectuar la fusión directa. Un arco eléctrico es formado en el espacio entre la punta de los alambres y como los dos alambres son continuos alimentan simultáneamente.



Figura 2.11 Pistola de proyección por arco eléctrico.<sup>37</sup>

Dado que los alambres son fundidos directamente por el arco, la eficiencia térmica de este proceso es considerablemente más alta que ningún otro proceso de proyección térmica. Un chorro de aire de alta velocidad localizado atrás de la intersección de los alambres lanza el metal fundido que se forma continuamente conforme los alambres son alimentados en el arco y es fundido. El arco formado en la punta de la pistola es mostrado en la figura 2.12.

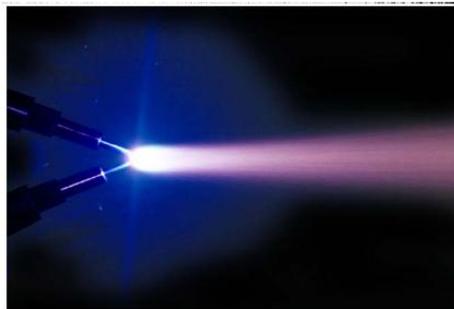


Figura 2.12 Arco formado en la punta de la pistola entre los dos electrodos de alambre.<sup>38</sup>

Los rangos de flujo de aire de alta velocidad están alrededor de 0.8 a 1.8 m<sup>3</sup>/min. Conforme se forma el material fundido de los alambres, se atomiza el material en finas partículas, creando una fina distribución de gotas de metal fundido. El aire atomizado es usado para acelerar las partículas hacia la superficie del sustrato, donde impactan las partículas fundidas, se deforman y solidifican para formar el recubrimiento.

A diferencia de la proyección térmica por plasma o por flama, las gotas son fundidas cuando el material es tomado e introducido en el chorro, y a diferencia de otros procesos las

<sup>37</sup> Pistola de proyección por arco. Fuente: [www.flamespray.com.mx](http://www.flamespray.com.mx)

<sup>38</sup> Proyección térmica por arco eléctrico. Fuente: [http://primaloy.com/praxair\\_hp.htm](http://primaloy.com/praxair_hp.htm)

partículas empiezan a enfriarse inmediatamente después de dejar la zona del arco. A fin de minimizar la oxidación en los procesos de proyección por arco eléctrico, el tiempo de estancia necesita ser reducido mediante el uso de distancias cortas y altos flujos de aire atomizado. La figura 2.13 muestra el diagrama del equipo de proyección por arco eléctrico.

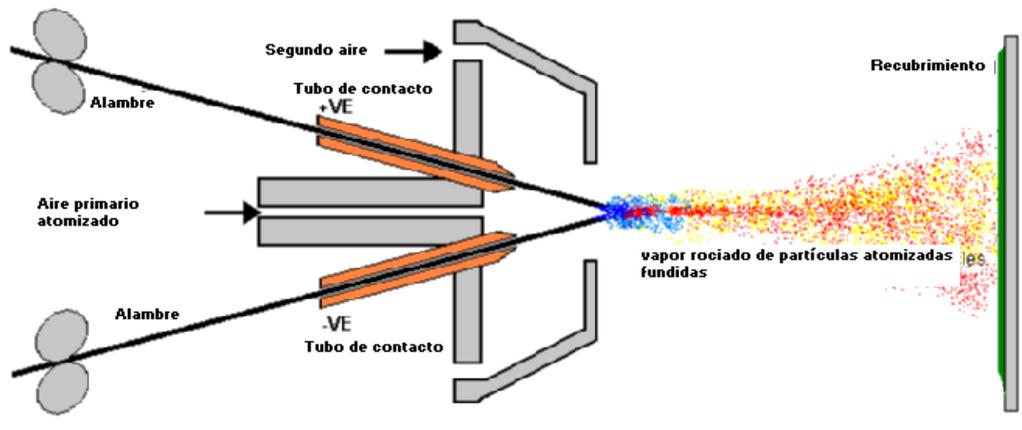


Figura 2.13 Diagrama de proyección por arco eléctrico.<sup>39</sup>

La proyección por arco eléctrico transfiere menos calor al sustrato por unidad de material proyectado que cualquier otro proceso de proyección térmica convencional debido a la ausencia de una flama o chorro de plasma. La única entrada de calor a la pieza es el calor sensible retenido por las partículas individuales en el vapor proyectado. Las partículas generadas por proyección en arco eléctrico son generalmente de tamaño y distribución similar a los alimentados por polvo usados en la proyección por plasma y por flama.

El tamaño de partícula y la distribución son función de los parámetros utilizados. El tamaño de la partícula aumenta conforme se incremente la corriente eléctrica, se disminuya el voltaje, se disminuya la presión o flujo en el aire de arrastre o se aumente el diámetro del alambre a una velocidad de alimentación constante. Se ha observado que los tamaños de las partículas fundidas se encuentran en un rango desde submicroscópico hasta alrededor de 200 micrómetros. Dependiendo de los parámetros del proceso, las partículas fundidas son de forma esférica.

Las irregularidades en la atomización están en función de la uniformidad de alimentación, estabilidad del voltaje y corriente del arco, variación de la distancia del arco, y la longitud del alambre que sale de la guía de los alambres. La variación en la distancia del arco en la punta de los alambres puede ser causada por varios factores, incluyendo deformaciones permanentes en los alambres, desgaste, y/o desalineación de las guías de los alambres.

Las velocidades de alimentación del material en la proyección por arco eléctrico son relativamente altas en comparación con otros procesos de proyección térmica. La tabla 2.1 nos menciona algunas velocidades de alimentación típicas para alambres comunes de proyección.

<sup>39</sup> Diagrama de proyección por arco eléctrico. Fuente: <http://www.gordonengland.co.uk/aws.htm>

Alambre	g/min/(lb/h)/100 A dc
Aluminio	45(6)
Babbitt	379(50)
Latón	83(11)
Cobre	83(11)
Molibdeno	76(10)
Acero	76(10)
Acero Inoxidable	76(10)
Estaño	341(45)
Titanio	23(3)
Zinc	182(24)

Tabla 2.1 Velocidades de alimentación.<sup>40</sup>

Los materiales para proyección por arco eléctrico están limitados a materiales conductores que pueden ser convertidos en alambres. El uso de alambres con núcleo ha expandido el rango de materiales a ser incluidos como los Cermets y materiales amorfos. Los alambres con núcleo consisten en un tubular metálico con polvo en el núcleo interior. Estos polvos son usualmente carburos o aleaciones amorfas. Los alambres con núcleo pueden ser fabricados envolviendo un alambre de calibre más pequeño con un revestimiento de una aleación similar.

#### 2.4.2 EQUIPO Y COMPONENTES

El sistema de proyección por arco eléctrico típico consiste en:

- Voltaje constante.
- Suministro de aire comprimido.
- Alimentador de alambre comprendido de un motor eléctrico o neumático, ruedas guías y dispositivos tensores de ruedas guía.
- Pistola de proyección por arco eléctrico comprendida del cuerpo de la pistola, boquilla de aire, puntas de alambre guía/contacto, conducto de aire y cubierta o armadura del arco.
- Mangueras / cables.

La estabilidad del arco es controlada por varios factores, incluyendo el diseño de suministro de energía, la rectitud del alambre, las tolerancias de la guía del alambre y la constancia de alimentación del alambre. El diseño del suministro de energía limita a la mayoría de los sistemas a operar por encima de 50A DC; muy pocos diseños permiten operar por debajo de 25A DC.

La atomización del flujo de aire también sirve como refrigerante de aire para las guías del alambre o para las puntas de contacto. Aire limpio, seco y comprimido es requerido para una prolongada vida y una operación continua. La mayoría de los sistemas requieren arriba de 1.8m<sup>3</sup>/min. (65scfm) y 690kPa (100psi). Aceite y humedad en el aire permite la oxidación del recubrimiento, contaminación del sustrato e inclusiones en el recubrimiento. Los proveedores de energía utilizados para proyectar por arco eléctrico son rectificadores modificados tipo fuentes de voltaje constante como las usadas en soldadura, ver figura 2.14.

<sup>40</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 60



Figura 2.14 Equipo de proyección por arco eléctrico.<sup>41</sup>

Los rangos de operación típicos están de 15 a 400A DC. y de 50 a 250V DC., con voltajes de circuito abierto a 40V DC. Pocas unidades utilizan fuentes de poder de tipo invertido, dado que los inversores requieren circuitos especiales para prevenir corto circuito de los alambres en la zona del arco.

### 2.4.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO.

La característica de depósito más frío de la proyección por arco eléctrico minimiza el calor asociado al sustrato referente a otros procesos de proyección térmica. Esto da a la proyección por arco eléctrico una ventaja en el proceso para aplicaciones donde las temperaturas de recubrimiento/sustrato requieren mantenerse bajas. Esto habilita al proceso de proyección por arco eléctrico a depositar sobre polímeros, fibra de vidrio, madera, productos de papel, metales o vidrio.

Las microestructuras de la proyección por arco eléctrico varían ampliamente según los parámetros de operación, el recubrimiento promedio por este proceso es caracterizado por salpicaduras que son más gruesas y variadas en tamaño que aquellas vistas en los recubrimientos por flama alimentados por alambre o por plasma y con más alto contenido de óxidos. En los procesos con alimentación por polvos, el material no fundido es comúnmente observado en sus recubrimientos. Apreciaciones similares son vistas en las microestructuras del proceso por arco eléctrico, pero en este caso, son partículas resolidificadas, esto es, partículas que se fundieron de los alambres y que resolidificaron antes del impacto.

Las microestructuras de la proyección por arco eléctrico pueden ser mejoradas:

- Usando alambres de diámetro más pequeño, depositados a flujos de alimentación más bajos (corriente).
- Usando conductos de aire de alta velocidad para reducir el tiempo de permanencia.
- Reduciendo la distancia de separación para reducir la oxidación.
- Reduciendo el voltaje del arco para minimizar el sobrecalentamiento de las gotas de material fundido.

<sup>41</sup> Equipo de proyección por arco eléctrico. Fuente: [www.sulzermetco.com](http://www.sulzermetco.com)

La figura 2.15 muestra algunos de esos efectos. Nótese que los splats y las series de óxidos son algo delgados y los niveles de porosidad son más bajos que aquellos típicamente observados en recubrimientos proyectados por flama y por plasma. Esos atributos pueden ser asociados en parte con las más elevadas temperaturas de las gotas de material fundido y el más corto tiempo de permanencia. La proyección por arco eléctrico de cámara inerte ha sido desarrollada; puesto que la proyección con gas inerte, en lugar de usar aire comprimido, sirve para reducir el contenido de óxidos.



Figura 2.15 Acero rociado por arco eléctrico utilizando alambres de diámetro pequeño.<sup>42</sup>

La figura 2.16 representa algunas de las mejoras en la microestructura que han sido hechas utilizando proyección por arco eléctrico con gas inerte. Nótese que los dispositivos de inclusiones de óxidos en los recubrimientos realizados en estas cámaras son virtualmente eliminados.

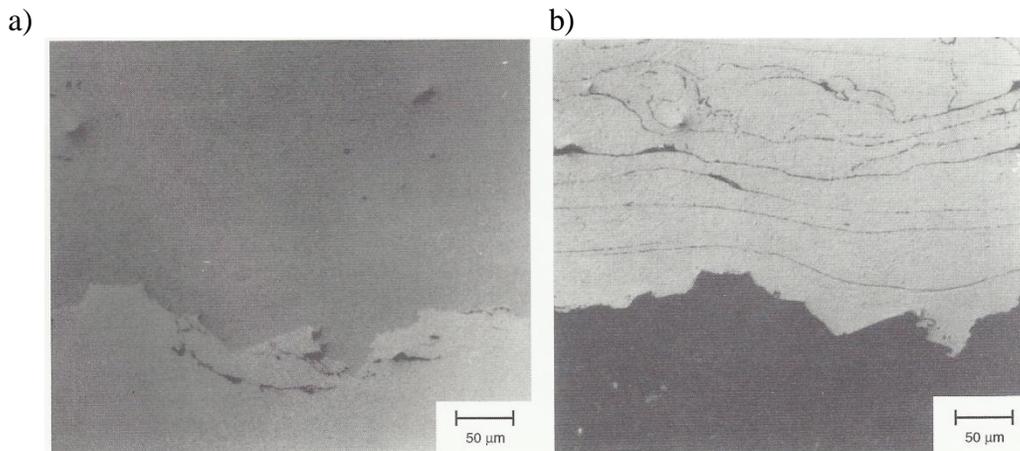


Figura 2.16 Proyección de titanio (a) normal. (b) mejorado.<sup>43</sup>

La proyección por arco eléctrico ocupa un lugar importante en la tecnología de proyección térmica y está situada particularmente en la posición de alto porcentaje de deposición.

<sup>42</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 64

<sup>43</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 64

Áreas específicas de interés para este único atributo son las estructuras municipales y civiles como las estructuras de acero, puentes, tanques de almacenamiento de agua y recubrimientos marinos de cubiertas y chimeneas. En el caso de recubrimientos de zinc, la naturaleza algo porosa de este recubrimiento catódico deja excelente protección a la corrosión, particularmente cuando se impregna de pinturas epóxicas, las cuales sellan las porosidades abiertas. Los recubrimientos por arco eléctrico pueden hacerse mucho más rugosos que con otros procesos de proyección térmica, lo que los hace estar bien situados para ser usados como recubrimientos superficiales antiderrapantes.

## 2.5 PROYECCIÓN POR PLASMA.

### 2.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.

Plasma, a menudo llamado el cuarto estado de la materia. Consiste normalmente de átomos neutros, iones positivos y electrones libres. El plasma es producido por transferir energía dentro de un gas hasta que el nivel de energía es suficiente para ionizar el gas, permitiendo a los electrones y a los iones actuar independientemente uno del otro. El estado del plasma se logra cuando, bajo un campo eléctrico, las corrientes pueden ser sostenidas conforme los electrones libres se mueven a través del gas ionizado.

El tungsteno es usado como cátodo por dos razones: primero por su alto punto de fusión ( $>3500$  K), y segundo por ser un buen emisor termo-iónico que con facilidad libera electrones para mantener la descarga del arco. Los gases que forman el plasma son introducidos a través de la parte posterior de la pistola. Esos gases entran a la cámara del arco a través de un inyector de gas el cual proporciona un vórtice al gas. El vórtice estabiliza el arco en la punta del cátodo en la región de baja presión del vórtice y rota la unión del arco hacia el ánodo. A esto se le llama estabilización del vórtice. La rotación de la unión del arco del ánodo minimiza la erosión por arco del ánodo. La figura 2.17 muestra una pistola por arco de plasma en operación.



Figura 2.17 Pistola por arco de plasma, combina un cátodo axialmente alineado (1 a 2% de tungsteno toriado) y un ánodo de boquilla (cobre OFHC).<sup>44</sup>

<sup>44</sup> Pistola por arco de plasma. Fuente: [www.flamespray.com.mx/](http://www.flamespray.com.mx/)

Los gases son calentados conforme pasan alrededor o a través del arco. Los gases calientes se expanden radial y axialmente, acelerando conforme estos se expanden y salen a través de la boquilla. Muchos diseños de pistolas son convergentes o divergentes para adquirir expansiones supersónicas, lo cual incrementa la velocidad de la partícula. Otros diseños usan intencionalmente velocidades de plasmas subsónicas para incrementar el tiempo de permanencia.

### 2.5.2 EQUIPO.

Los sistemas de proyección por arco de plasma, ilustrados en la figura 2.18, consisten de componentes similares a otros sistemas de proyección térmica. Los componentes principales son:

- Suministro de gas.
- Mangueras de gas.
- Reguladores de gas para transporte de gases para el plasma y polvos.
- Pistola de proyección por arco de plasma.
- Controles eléctricos para arcos de corriente y voltajes.
- Fuente de poder de DC.
- RF (plasma de inducción conjunta) de alta frecuencia para la ignición del arco.
- Circuito de enfriamiento por agua.
- Alimentador de polvos.
- Refrigeración por agua de cables de energía.
- Mangueras y cables.
- Cámara para proyección en atmósfera inerte y/o baja presión.

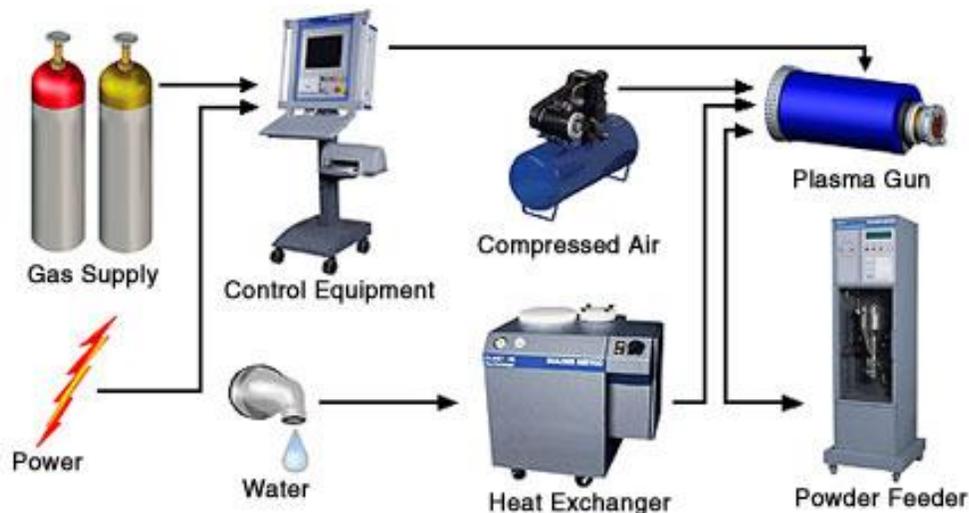


Figura 2.18 Sistema de proyección por arco de plasma.<sup>45</sup>

<sup>45</sup> Sistema de proyección por arco de plasma. Fuente: [www.sulzermetco.com](http://www.sulzermetco.com)

### 2.5.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO

El chorro de gas caliente creado por el arco de plasma se expande, introduce las partículas de polvo, calienta las partículas y las acelera hasta el sustrato, donde se impactan, deforman y resolidifican para formar el recubrimiento. El alto grado de partículas fundidas y la alta velocidad de partícula dejan depósitos de alta densidad y elevados esfuerzos de unión (34 a 69 MPa) comparados con los recubrimientos por flama o arco eléctrico. La baja porosidad de los recubrimientos por proyección por plasma puede ser comparados con los que produce el HVOF y la D-Gun que están arriba del 99%. El gas inerte usado en el plasma, ignorando los efectos del ambiente, contribuye a una baja cantidad de óxidos comparado con otros procesos de proyección térmica; la interacción de la turbulencia del chorro plasma con el ambiente introduce aire que oxida la superficie de las partículas fundidas en el vuelo permitiendo la formación de fases de óxido que se ven como inclusiones de óxido inter-splat. Las figuras 2.19 a) y b) muestran la microestructura típica de proyección por plasma, ilustrando la oxidación del recubrimiento.

a)



b)



Figura 2.19 Microestructura típica de proyección por plasma: (a) Alto nivel de oxígeno en recubrimiento NiAl. (b) Nivel típico de gas en recubrimiento 80Ni/20Cr.<sup>46</sup>

<sup>46</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 69

La calidad de los recubrimientos también depende de parámetros o variables como los modelos o patrones de proyección, aumento del recubrimiento, variaciones del proceso, control de temperatura, movimiento de la flama o del sustrato y eficiencia de deposición.

Las operaciones posteriores a la aplicación del recubrimiento aumentan aún más la calidad de los recubrimientos por proyección térmica. Estas operaciones incluyen tratamientos de acabado (como pulido), tratamientos de densificación (como fusión, tratamientos térmicos) y sellado entre otras.

Además de esos pasos y parámetros clave, es importante entender como diseñar recubrimientos para un óptimo desempeño. Los recubrimientos por proyección térmica son fabricados mediante la combinación de equipos (pistolas de proyección o flamas, manipuladores, etc.), alimentación de materiales (polvos, alambres o barras) y el saber cómo de los procesos (la experiencia). Solo cuando todos los componentes del proceso son usados correctamente se obtiene un recubrimiento bien diseñado.

## *2.6 PROCESO DE ROCIADO EN FRÍO (COLD SPRAY).*

El proceso de rociado en frío (cold spraying) es un proceso de deposición de materiales en el que partículas relativamente pequeñas (varían de tamaño en el rango de 1 a 50  $\mu\text{m}$  de diámetro) en estado sólido son aceleradas a altas velocidades (típicamente en el rango de 300 a 1200 m/s) las cuales subsecuentemente desarrollan un recubrimiento o depósito en un sustrato apropiado a través del impacto de dichas partículas de alta velocidad. Han sido acuñados varios términos referidos a la forma general de esta técnica: “metalización por energía cinética”, “rociado cinético”, “deposición de polvos a alta velocidad” y “método de rociado en frío por dinámica de gas”. En la mayoría de los casos, partículas deformables de polvos son llevadas a altas velocidades a través de su introducción en una boquilla, empleando los principios de dinámica de gases para flujos convergentes para desarrollar chorros de gas a alta velocidad.

El mecanismo por el cual las partículas de estado sólido se deforman y se adhieren tanto al sustrato unas con otras, es aún poco entendido; sin embargo se piensa que el impacto a alta velocidad rompe las películas de óxidos sobre la partícula y las superficies del sustrato, presionando sus estructuras atómicas de manera que se logra un contacto íntimo de unas con otras bajo presiones y temperaturas momentáneas en sus intercaras. Esta hipótesis es consistente con el hecho de que mientras varios materiales dúctiles, incluyendo metales y polímeros han sido depositados mediante rociado en frío, materiales duros o frágiles tales como los cerámicos no han sido bien depositados sin que ellos sean co-depositados con una matriz de materiales dúctiles.

El aspecto distintivo del proceso de rociado en frío comparado con otros procesos de proyección térmica es su capacidad para producir recubrimientos con temperaturas de precalentamiento de gases en el rango de 0-700°C, un rango que es generalmente más bajo que el punto de fusión de los materiales que se usarán como recubrimiento. La temperatura a la salida de la boquilla es sustancialmente más baja que la temperatura de precalentamiento del gas, con lo que se consigue reducir la temperatura experimentada por

las partículas de alimentación. En consecuencia, los efectos negativos de esfuerzos residuales, mala adhesión y otros efectos asociados con los métodos de proyección térmica son minimizados o eliminados.

La figura 2.20 compara la velocidad de la partícula y los rangos de temperatura del gas de arrastre con otros procesos por proyección térmica.

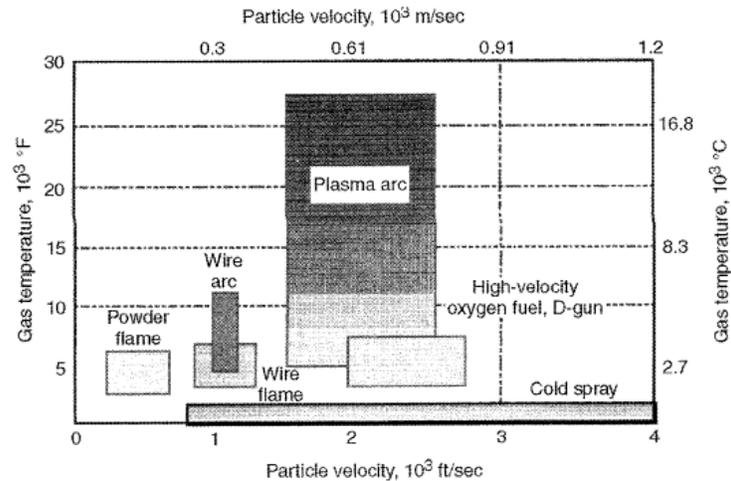


Figura 2.20 Régimen de temperatura/velocidad de los procesos de proyección térmica.<sup>47</sup>

Cuando la velocidad de la partícula ( $V_p$ ) es demasiado baja para una combinación dada de recubrimiento/sustrato, las partículas de alimentación son simplemente reflejadas en la superficie y no forman un depósito continuo. A altos valores de  $V_p$  la erosión de la superficie puede tener lugar, tal como ocurre con el granallado. Cuando  $V_p$  excede un valor crítico  $V_{crit}$  (el cual varía con la combinación de material de la partícula y el material del sustrato), las partículas comienzan a deformarse plásticamente, se adhieren al sustrato y forman capas sucesivas del recubrimiento.

El proceso de proyección en frío fue desarrollado originalmente a mediados de los años 1980's en el Instituto de Mecánica Teórica y Aplicada en la Academia Rusa de Ciencias en Novosibirsk, Siberia por A. Papyrin y sus colegas. Ellos lograron depositar un amplio rango de metales puros aleaciones metálicas y compuestos sobre varios sustratos, demostrando la factibilidad del rociado en frío para muchas aplicaciones.

### 2.6.1 EQUIPO PARA ROCIADO EN FRÍO Y SUS PARÁMETROS DE PROCESO.

La figura 2.21 es un esquema de un sistema típico de rociado con gas en frío. El gas de proceso se introduce a través de un módulo de control de gas a un sistema de salidas múltiples que contiene un calentador de gases y un dispositivo de alimentación de polvos. El gas presurizado se calienta a una temperatura de precalentamiento, frecuentemente usando una bobina que calienta mediante resistencia eléctrica. El gas calentado no se usa para fundir las partículas, sino para que alcance velocidades supersónicas para que las partículas tengan un impacto de muy alta energía cinética. El gas de alta presión se

<sup>47</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 77

introduce en la sección convergente de una tobera tipo Laval (por ejemplo, una tobera convergente-divergente), el gas acelera a velocidades sónicas en la región de la garganta de la tobera, y el flujo se vuelve entonces supersónico (en el rango de número de Mach de 2 a 4) mientras se expande en la sección divergente de la tobera. El gas se enfría en tanto se va expandiendo en la tobera, frecuentemente enfriando a la tobera temperaturas por debajo de la temperatura ambiente (de ahí el nombre de rociado en frío). Los polvos se alimentan frecuentemente de manera coaxial con el orificio de la garganta por el lado de alta presión, y es dosificado con precisión por un dispositivo anexo.

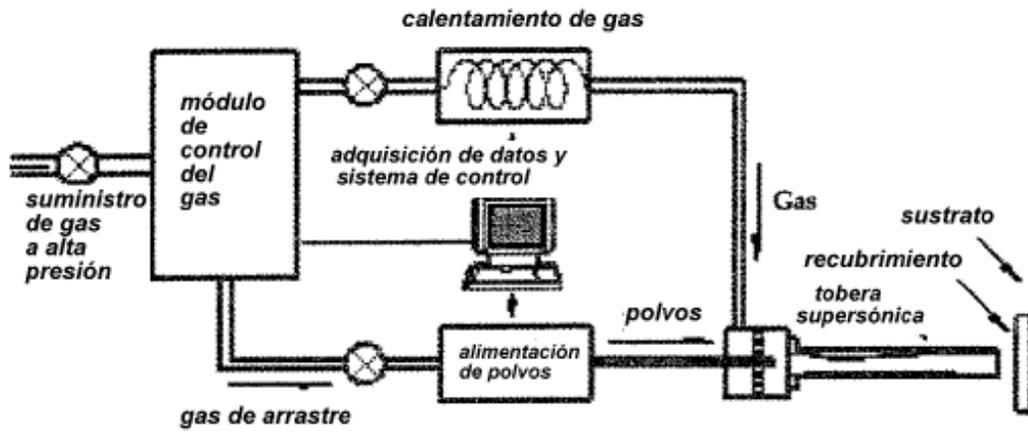


Figura 2.21 Diagrama esquemático del sistema de rociado en frío.<sup>48</sup>

Los gases del proceso incluyen nitrógeno, helio, aire y mezclas de esos gases. El nitrógeno es el gas de proceso predilecto debido a que puede ser usado para rociar materiales sin proveer su oxidación, y también por su relativo bajo costo comparado con otros gases que pueden ser utilizados.

## 2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES DE LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA.

Los recubrimientos por proyección térmica exhiben una arquitectura micro-estructural única en su género. Los recubrimientos son formados por partículas fundidas y semifundidas de diferentes tamaños que fluyen a razón de un millón de partículas por segundo, según proceso y parámetros de operación, que se superponen una a otra.

### VENTAJAS.

Muchos otros defectos identificables son controlables a través de un equipo apropiado y selección de alimentación, pero la gran influencia en la estructura de los recubrimientos viene de los pasos de procesamiento que ya se describieron. Las propiedades del recubrimiento proyectado radican en la forma laminar de las partículas aplanadas (o splats) y la porosidad residual puede ser revertida solo por tratamientos posteriores a la deposición.

<sup>48</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 78

La porosidad puede ser en ocasiones un beneficio. La porosidad superficial puede retener aceites lubricantes y de esta manera restaurar la superficie de un rodamiento con lubricación durante periodos en los que el suministro de aceite haya disminuido. El rápido enfriamiento de partícula y la micro-estructura laminar resultante son dos de las características más distintivas de los recubrimientos realizados por proyección térmica. La fragilidad, dureza, propiedades anisotrópicas y altas esfuerzos internos (residuales) son el resultado de un enfriamiento muy rápido y aplanamiento de las partículas.

Aplicado apropiadamente el recubrimiento de proyección térmica tiene varios usos y a menudo muchas ventajas:

- Un amplio rango de materiales que pueden ser depositados como recubrimiento.

Incluyen metales, aleaciones, carburos cerámicos provenientes de óxidos y también aquellos que no provengan de ellos, metales refractarios, plásticos, cermets, y estructuras especiales compuestas comprendidas por metales, cerámicos y plásticos; también como combinación de estos. Procesos de recubrimiento competitivos no afrontan esta versatilidad.

- Degradación térmica del sustrato.

Existe un pequeño riesgo de degradar térmicamente el sustrato durante la proyección. La proyección térmica es un proceso relativamente en frío y los sustratos permanecen debajo de los 15°C, temperaturas más elevadas son logradas si se desea y pueden ser usadas si las provisiones están hechas para controlar la oxidación.

- Amplio rango de grosor de recubrimiento.

Grosos de recubrimientos de 50µm a 6.5mm (0.002 a 0.250 in) son usados hoy en día. Capacidades competitivas de recubrimiento en base al grosor se presentan a continuación:

- ✓ Pequeño para ningún cambio dimensional. Una superficie es modificada sin un recubrimiento finito aplicado. Ejemplos: el proceso de difusión, nitrurización, caturización, implantación, implantación de iones.
- ✓ Películas delgadas. Recubrimientos finitos arriba de 0.01µm de espesor. Ejemplos: deposición química de vapor (CVD), deposición física de vapor (PVD), implantación de iones, etc.
- ✓ Recubrimientos intermedios. Recubrimientos de 0.01 a 0.05µm de espesor. Ejemplos: PVD, chapeado, recubrimientos organometálicos.
- ✓ Recubrimientos gruesos. Recubrimientos de 50µm, 6.5µm o más. Ejemplos: Proyección térmica, procesos de soldadura, algunos procesos de chapeado, PVD por haz de electrones (EB-PVD).

- Costos de los equipos y su portabilidad.

El equipo básico de proyección térmica es de un costo relativamente bajo (va de \$7000 USD a \$10,000 USD para combustión de baja velocidad o arco eléctrico hasta \$75,000 USD para equipos de plasma) es pequeño y portátil, y permite proyecciones in situ. La excepción son la proyección por plasma de vacío, los sistemas de plasma altamente equipados y el HVOF, aunque en ciertas aplicaciones, la inversión en estos equipos puede incluso resultar menor que invertir en equipos, suministros y controles operacionales y ambientales para otros procesos (por ejemplo, un sistema completo para CVD)

➤ Bajos costos de procesamiento.

Las elevadas velocidades de deposición, que van de 1 a 45 kg/h (2 a 100lb/h) o más. Típicamente, de 2 a 7 kg/h son de práctica normal. Las elevadas velocidades de proyección y deposición de recubrimiento resultan en un relativo bajo costo de proceso.

➤ Amplio rango de aplicación.

Los recubrimientos por proyección térmica funcionan de manera efectiva para un amplio rango de aplicaciones incluyendo:

- ✓ Resistencia al desgaste.
- ✓ Recubrimientos multicapas para barrera térmica (TBCs) comprendido de capas metálicas unidas y de capas superiores de cerámicos provenientes de óxidos.
- ✓ Recubrimientos con finalidad desgastable y abrasivos para turbinas.
- ✓ Control de corrosión atmosférica y acuosa.
- ✓ Resistencia a la oxidación a altas temperaturas y control de corrosión.
- ✓ Resistencia eléctrica y conductividad.
- ✓ Estructuras metálicas y de matriz cerámica.
- ✓ Manufactura o restauración de componentes cercanos a la forma original.

La tabla 2.2 muestra los procesos de proyección térmica empleados en sectores industriales.

Sector Industrial	flama	Rociar/fundir	HVOF	D-Gun	Arco de plasma al aire	de Arco de plasma al vacío
Turbinas de gas	X		X	X	X	X
Agricultura	X	X			X	
Arquitectura	X	X			X	
Automotriz	X		X		X	
Cemento	X	X	X			
Química	X	X	X	X	X	
Aerospacial	X		X	X	X	X
Motores Diesel	X		X		X	
Eléctrica electrónica			X	X	X	X
Alimenticia	X	X	X	X	X	X
Conformado de metales	X		X			
Manufactura de vidrio		X		X	X	
Turbinas hidráulicas	X		X	X	X	X
Siderúrgica	X	X			X	
Médica			X	X	X	X
Minera	X	X	X		X	
Nuclear			X	X	X	
Petróleo y gas	X	X	X	X	X	
Equipo de impresión			X	X	X	
Papel y pulpa	X		X		X	
Manufactura de hule y plásticos	X	X	X		X	

Tabla 2.2 Procesos de proyección térmica empleados en varios sectores industriales.<sup>49</sup>

<sup>49</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 10

La tabla 2.3 muestra los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica en sectores industriales.

Sector Industrial	Carburos	Auto fundentes	Fe y acero	Aleaciones de Niquel	Super aleaciones	MCrAlY	Aleaciones Cobalto	No Ferrosos
Turbinas de gas	X		X	X	X	X	X	X
Agricultura		X	X	X				X
Arquitectura	X							X
Automotriz	X	X		X	X	X	X	
Cemento		X	X					X
Química			X	X	X		X	
Aerospacial	X	X	X	X	X	X	X	X
Motores Diesel	X		X	X	X	X	X	
Eléctrica y electrónica								X
Alimenticia		X	X					
Conformado de metales		X	X	X	X		X	
Manufactura de vidrio	X	X	X					
Turbinas hidráulicas	X	X	X	X	X		X	X
Siderúrgica		X	X	X	X		X	X
Médica								X
Mínera		X	X					X
Nuclear								
Petróleo y gas		X	X	X			X	X
Equipo de impresión								X
Papel y pulpa		X	X	X				X
Manufactura de hule y plásticos		X	X	X			X	

Tabla 2.3 Recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica empleados en varios sectores industriales.<sup>50</sup>

Como se resume en la tabla 2.4 estas industrias usan recubrimientos por proyección térmica porque ellos ofrecen mejorar:

- ✓ Resistencia al desgaste.
- ✓ Resistencia al calor (recubrimientos de barrera térmica).
- ✓ Control dimensional y tolerancias.
- ✓ Propiedades eléctricas (resistencia y conductividad).

<sup>50</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 11

Sector Industrial	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Turbinas de gas	X	X	X	X			X	X	X	X	X		
Agricultura	X			X		X				X			
Arquitectura	X					X							
Automotriz	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	
Cemento	X					X				X	X		
Química	X			X						X	X		
Aerospacial	X	X	X	X	X	X	X			X			
Motores Diesel	X	X		X		X	X			X	X		
Eléctrica y electrónica												X	X
Alimenticia	X									X			
Conformado de metales	X	X				X				X	X		
Manufactura de vidrio	X	X								X	X		
Turbinas hidráulicas	X	X	X	X	X					X	X		
Siderúrgica	X			X		X				X	X		
Médica	X		X							X	X		
Minera	X			X	X	X				X	X		
Nuclear											X		
Petróleo y gas	X	X		X		X				X	X		
Equipo de impresión	X	X								X			
Papel y pulpa	X				X	X				X	X		
Manufactura de hule y plásticos	X			X		X				X	X		
Naval	X			X						X	X		
Transporte	X	X					X			X	X	X	
Textil	X									X			
Ferroviaria	X	X				X				X	X		X

Desgaste abrasivo	A
Desgaste adhesivo	B
Desgaste por rozadura	C
Erosión	D
Cavitación	E
Impacto	F
Barrera térmica	G
Deliberadamente desgastable	H
Deliberadamente abrasivo	I
Restauración dimensional	J
Corrosión/oxidación	K
Resistencia eléctrica	L
Conductividad eléctrica	M

Tabla 2.4 Usos de los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica de importancia en varios sectores industriales.<sup>51</sup>

### ÁREAS DE FUTURO CRECIMIENTO.

Las áreas importantes que determinarán el crecimiento futuro incluyen:

- Avances continuos en equipos de control de proceso (robótica, control de movimiento, tecnología de gas a presión, sensores de tiempo real, etc.).
- Mejoramiento de métodos para pruebas no destructivas y evaluación de recubrimientos.
- Mejorar el entendimiento y optimización de los procesos de proyección en frío.

<sup>51</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 12

- Formado por proyección térmica de partes aproximadas a la forma deseada.
- Formado por proyección de óxidos cerámicos superconductores de alta temperatura crítica ( $T_c$ ).
- Diseño asistido por computadora (CAD), técnicas de prototipos rápidos como la estereolitografía.
- Síntesis de deposición de diamante.
- Deposición de película delgada por LPPS (Low Pressure Plasma Spraying).
- Mejoramiento de las técnicas de alimentación de producción y control de calidad.

#### *DESVENTAJAS.*

Los recubrimientos por proyección térmica también tienen sus defectos y es importante que estos sean entendidos para que los diseñadores puedan evitar aplicar recubrimientos en situaciones donde el desempeño satisfactorio es poco prometedor.

A menudo, las fallas ocurren dado que las limitaciones de los recubrimientos nunca fueron considerados o fueron pobremente entendidas.

- Baja adherencia.

El esfuerzo de tensión de adhesión logrado por proyección térmica es relativamente bajo comparado con otros procesos de recubrimiento. Usando la norma ASTM Standard C633, la tensión de adhesión es medida entre 41 y 83 MPa (de 6 a 12ksi). Los procesos de chapeado, soldadura y deposición de vapor usualmente tienen valores mínimos de 103 MPa (15ksi), dependiendo del recubrimiento y la química del sustrato. La adhesión en el proceso de soldadura es por supuesto substancialmente más elevada de 103 Mpa.

- Porosidad.

Los recubrimientos son generalmente algo porosos, permitiendo así el paso de los gases y/o líquidos a través de la interfase recubrimiento/sustrato. La porosidad es controlable por debajo de valores de aproximadamente 1%, algunas veces la porosidad es benéfica, por ejemplo en las TBC's, para obtener un recubrimiento verdaderamente libre de poros es necesario algún tratamiento posterior a la deposición como fusión o presurización isostática en caliente. La porosidad puede ser minimizada usando HVOF con proyección por plasma de vacío VPS. La porosidad superficial puede ser minimizada a través de la aplicación de selladores líquidos orgánicos. Procesos competitivos como la deposición de vapor, chapeado y el revestimiento son normalmente libres de poros.

- Propiedades anisotrópicas.

Los recubrimientos por proyección térmica son anisotrópicos, esto es, tienden a poseer arriba de 10 veces más el esfuerzo de tensión en la dirección longitudinal que en la dirección paralela a la proyección. Estos son generalmente más quebradizos que lo correspondiente a materiales forjados o fundidos y no resistencia al impacto.

- Baja capacidad de carga.

Los recubrimientos por proyección térmica no se usan generalmente como miembros estructurales y no se desempeñan adecuadamente debajo de puntos o líneas de carga. Sin

embargo, estudios a partir de las tecnologías del HVOF y VPS demuestran que es posible que se fabriquen recubrimientos potenciales para estas aplicaciones. Los recubrimientos por proyección térmica se desempeñan mejor en aplicaciones donde la carga aplicada es a compresión, explicando así su amplio uso para resistencia al desgaste por deslizamiento. Cargas puntuales y lineales causan problemas y el recubrimiento se colapsa, resultando en una deformación permanente de la superficie.

- Proceso omnidireccional (Restringido a actuar exclusivamente sobre el área de impacto del chorro).

La deposición de recubrimientos por proyección térmica sobre configuraciones geométricas simples es relativamente directa, pero formas o contornos complejos, como es el caso de turbinas de gas y superficies aerodinámicas, requiere controles computarizados automáticos o robots. Desviaciones de proyección normal a la superficie ( $90^{\circ} \pm 20^{\circ}$ ) compromete las propiedades del recubrimiento. Procesos competitivos que también son limitadas por las restricciones de la acción del proceso áreas específicas del sustrato incluyen a la implantación iónica y la PVD.

## **CAPÍTULO 3. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.**

### *3.1 PROCESAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO.*

El procesamiento de los recubrimientos por proyección térmica puede involucrar alguno o todos los pasos que se mencionarán. Cada paso representa una parte esencial de la planeación del proceso y deben ser considerados antes y durante el procesamiento del recubrimiento.

La proyección térmica comienza con la apropiada preparación de la superficie: limpieza y creación de la rugosidad mediante el rociado de arena, macro-maquinado o combinación de estos procedimientos. La reparación de partes desgastadas requiere algunas veces de rebajar la pieza para remover la superficie dañada del material y cuadrar la superficie para la restauración dimensional.

Después de la preparación de la superficie, un tipo de máscaras protegen los componentes seleccionados cercanos a la zona que va a ser recubierta de la indeseable abrasión o impacto de la proyección de la partícula. Los métodos más comunes para enmascarar incluyen máscaras metálicas de sombra, cintas duras de altas temperaturas y aplicación de pinturas compuestas. Algunas cintas ofrecen protección contra los granitos de arena abrasivos y las partículas proyectadas.

Precalentar es el siguiente paso antes de proyectar, es usado para eliminar la humedad y para tener una superficie tibia y seca para las primeras partículas a impactarse. Sustratos de aluminio, cobre y titanio normalmente no se precalientan. Precalentar en exceso debe ser evitado, dado que esto puede oxidar la superficie y deteriorar la unión.

### *3.2 METALURGIA E HISTORIA TÉRMICA DE LOS SUSTRATOS.*

El tipo de material del sustrato, dureza y tenacidad previo a un tratamiento térmico, debe ser determinado para evaluar cómo se va a proceder. Los recubrimientos por proyección térmica pueden ser aplicados virtualmente a todas las superficies metálicas, y también a maderas, plásticos, vidrio, papel y demás. Los sustratos más frecuentemente recubiertos son los aceros, hierro, níquel, aleaciones de titanio, aluminio, cobre y magnesio.

#### *ACEROS ALEADOS Y AL CARBONO.*

Generalmente los aceros vienen tratados térmicamente, con durezas como mayor indicador de lo anterior. Los sustratos con durezas por debajo de 40 HRC puede ser factible darles rugosidad y proyectarlos usando la mayoría de las técnicas estándar. Cuando la dureza excede de 40 HRC, es difícil lograr una rugosidad superficial con granitos de arena o abrasivos; como resultado de esto, el esfuerzo de adhesión es adversamente afectado. Habrá un pequeño cambio de las condiciones para sustratos de acero tratados térmicamente cuando las temperaturas de precalentamiento y operación se mantengan alrededor de los 150 °C (300 °F), ya que puede presentarse ablandamiento o pandeo.

## ACEROS INOXIDABLES Y ALEACIONES DE NÍQUEL.

Deben ser manejados cuidadosamente. El precalentamiento alrededor de 100 °C (210 °F) acelerará el grosor de la transparente y tenaz capa de óxido de la superficie del acero inoxidable, provocando la mala adhesión de los recubrimientos proyectados. Los límites de las temperaturas de precalentamiento serán de 65 °C (150 °F) y se comenzará a proyectar inmediatamente cuando esa temperatura es registrada.

## ALEACIONES DE ALUMINIO, COBRE, MAGNESIO Y TITANIO.

Requieren un manejo especial cuando se usan granitos de arena abrasiva para crear la rugosidad. Se evitará el precalentamiento antes de proyectar. Una pequeña cantidad de calor aplicado a la superficie la convierte rápidamente en capas de óxido ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), lo cual produce una mala adhesión.

### 3.3 CONFIGURACIÓN DE LA PIEZA Y LOCALIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO.

Una vez que el área donde el recubrimiento va a ser aplicado ha sido identificada, se determinará si la pieza es simétrica respecto a la ubicación del recubrimiento, lo cual permitiría instalarla para poder rotarla y/o trasladarla respecto a un eje perpendicular a la flama. El flujo de partículas proyectadas debe impactar a la superficie tan cerca a una posición normal ( $90^\circ$ ) como sea posible; el mínimo ángulo de impacto aceptable es de  $45^\circ$  del área objetivo; como se muestra en la figura 3.1.

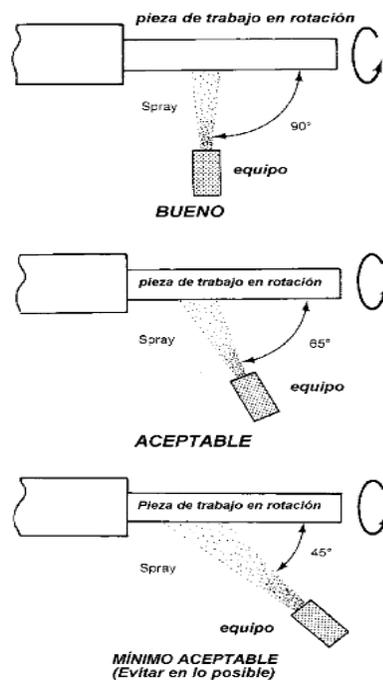


Figura 3.1 Posiciones de rociado.<sup>52</sup>

<sup>52</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 109

Un ángulo de impacto de 45° debe usarse solo como último recurso, teniendo en cuenta que puede esperarse alguna desviación de algunas propiedades del recubrimiento respecto a lo óptimo. Ambas, adherencia y cohesión del recubrimiento serán afectadas. La porosidad incrementa dramáticamente conforme el ángulo de la flama se mueve de la posición normal a 45°, como se muestra en la figura 3.2.

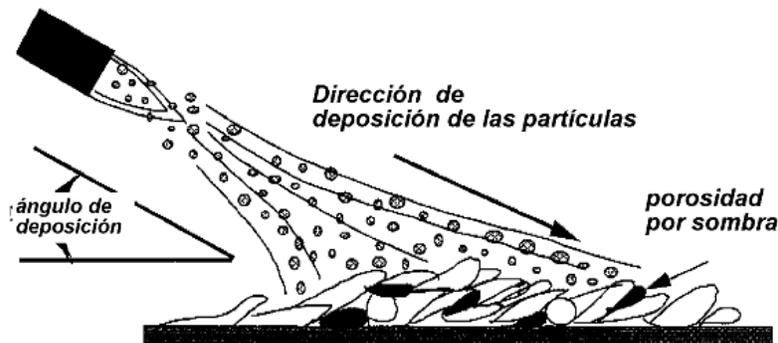


Figura 3.2 Formación de porosidad en recubrimientos rociados si el ángulo se reduce a 45°. <sup>53</sup>

Si la proyección debe hacerse a ángulos que van de 90° a 45°, primero se debe considerar si el recubrimiento considerado será capaz de funcionar como se requiere. Para obtener esta información, se proyecta una muestra de recubrimiento al ángulo de impacto esperado y se prueba su integridad antes de querer proyectar la pieza. El sustrato debe ser inspeccionado de defectos e imperfecciones, especialmente de grietas.

Las grietas estructurales no pueden ser reparadas usando la proyección de un recubrimiento, ni añade resistencia al sustrato. Los recubrimientos proyectados solo aumentan la superficie del sustrato y adicionan dimensión, pero no actúa como elemento estructural que provea de esfuerzo a la tensión, resistencia a la fatiga o tenacidad de fractura.

En suma, para evaluar las implicaciones adversas de los ángulos de proyección, cuando se examine el área seleccionada del sustrato, las siguientes prácticas y consideraciones de diseño deben ser ponderadas conforme al área seleccionada.

- Cuando el área objetivo del sustrato es socavada para aceptar el recubrimiento, como se muestra en la figura 3.3 a), siempre se hace un chaflán o se redondean las esquinas antes de proyectar. Esquinas puntiagudas o de 90° sueltan partículas, polvo y desechos y dejan áreas porosas. Las partículas proyectadas son improbables de cubrir la esquina.
- Del mismo modo, en el extremo de un recubrimiento proyectado transversal a la cara del sustrato, como se muestra en la figura 3.3 b), debe realizarse un chaflán o redondearse, 0.75 mm de radio o 45° son recomendables. Las cargas aplicadas a los extremos de los recubrimientos que no han sido redondeados o achaflanados

<sup>53</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 109

les causarán grietas y fracturas. Si el sustrato lo permite, es una buena práctica que se redondee o se hagan chaflanes al mismo antes de proyectar sobre él.

- La figura 3.3 c) muestra prácticas aceptables para depositar un recubrimiento sobre un sustrato. Usando un procedimiento similar a socavar o remover material, las esquinas deben ser redondeadas o achaflanadas. Las esquinas afiladas resultan probablemente en porosidad, recubrimientos de débil adhesión y actúan como concentradores de esfuerzos.

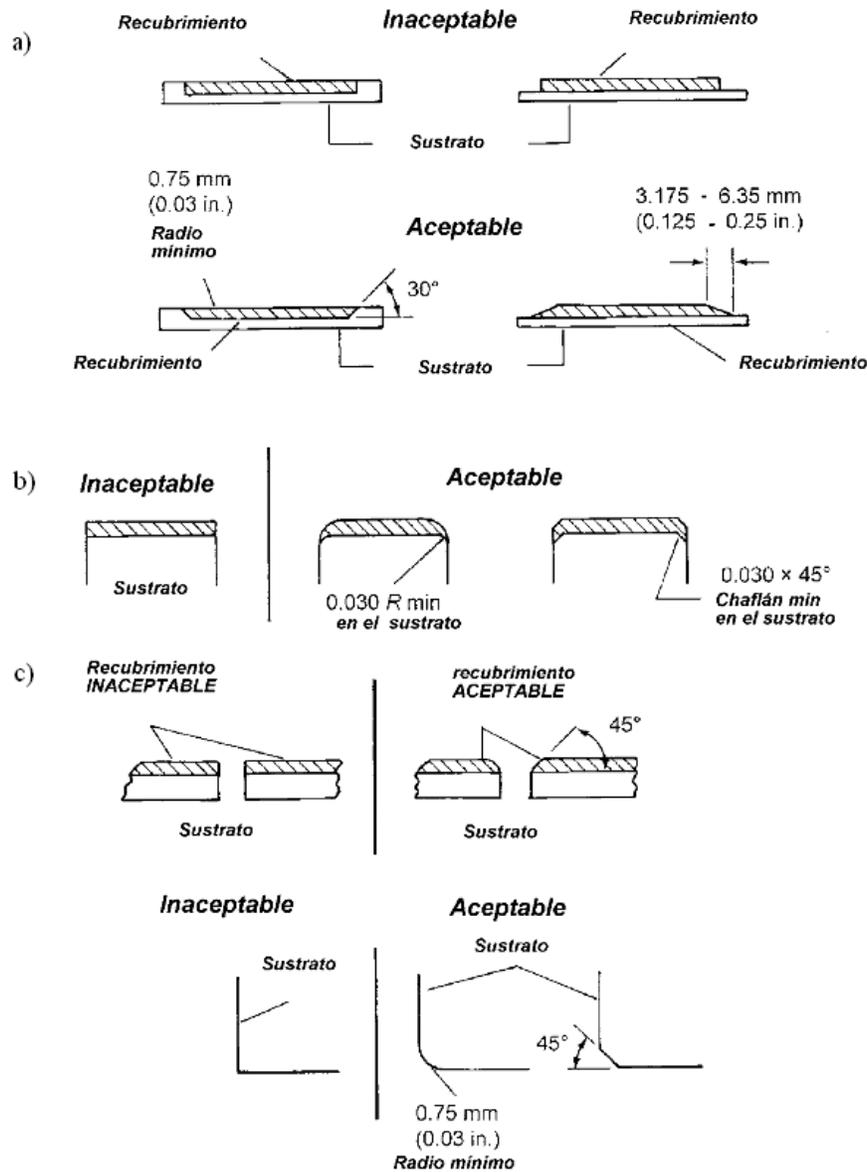


Figura 3.3 Diseño de la geometría del sustrato de un recubrimiento por proyección térmica.<sup>54</sup>

<sup>54</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 109

### 3.4 REACONDICIONAMIENTO DE LA SUPERFICIE O SUSTRATO.

Una apropiada preparación de la superficie del sustrato es absolutamente esencial. Del 50 al 75% del tiempo total requerido para la operación es normalmente requerido para operaciones de preparación y acabado.

#### LIMPIEZA.

El primer paso en la preparación de la superficie de un sustrato es remover los contaminantes como aceite, grasa, pintura, herrumbre, escamas y humedad. Los remanentes de contaminantes entre el recubrimiento a proyectar y el sustrato minimizan el contacto entre ellos y reducen su adhesión.

- Desengrasado por vapor. Es comúnmente usado para remover aceites, grasas y otros compuestos orgánicos. Es rápido, económico y eficiente. El desengrasado por vapor caliente es una variante que puede ser más rápida y eficiente. Materiales porosos como fundiciones y por metalurgia de polvos, deben ser remojadas de 15 a 30 minutos para disolver contaminantes escondidos. Piezas grandes pueden ser limpiadas con vapor o ser sumergidas en solventes. La limpieza manual con solventes es a menudo todo lo que se necesita para remover grasas y aceites superficiales. Los solventes más comunes utilizados son:
  - a) Metil-etil-cetona (MEK).
  - b) Acetona.
  - c) Soluciones con contenido de ácido acético.
- Horneado. Cuando el remojo con solventes no funciona para materiales porosos y por metalurgia de polvos, se hornea de 315 a 345 °C por unas cuantas horas que vaporizará y removerá los aceites penetrados. Si la pieza no se limpia de forma adecuada aceites residuales saldrán del sustrato sobre la superficie durante el precalentamiento y/o durante la proyección. El resultado es desastroso, muy probablemente el recubrimiento se desprenderá.
- Limpieza ultrasónica. Puede ser utilizada para eliminar algunos contaminantes en áreas confinadas o escondidas; además de poder utilizarse cuando los granos de arena quedan atrapados por el proceso de sand-blast. El sustrato se coloca de tal manera que los granos de arena puedan desalojarse en caída libre.
- Ráfagas de abrasivos húmedos. Usan una pasta a base de agua que contiene un medio abrasivo que es proyectado por chorros de aire hacia la superficie que ha sido preparada. El metal abrasivo variará, pero un tamaño de malla de 200 (74 µm) en óxido de aluminio es preferible. Inhibidores de la corrosión y compuestos antisolidificantes se agregaran normalmente. Pueden ser usados para remover escoria, productos de la corrosión, pinturas, aceites y grasas.
- Ráfagas de abrasivos en seco. Remueven contaminantes de la superficie. Más agresivo que el rectificado de vapor, este proceso es usado para remover viejos recubrimientos proyectados, costras de laminado, pintura, escoria, productos de la

corrosión y óxidos. El medio abrasivo es llevado por chorros a altas presiones de aire comprimido y dirigido hacia la superficie del sustrato.

### *RUGOSIDAD.*

Después de limpiar, la rugosidad es el paso más importante en la preparación de la superficie para aceptar el recubrimiento proyectado. Este es el paso más crítico para asegurar la buena adherencia del recubrimiento. Los métodos principales usados para crear rugosidad superficial son:

- a) Ráfagas de granos de arena en seco.
- b) Maquinado o macrorugosidad.
- c) Aplicación de una capa de unión.

A menudo son utilizadas combinaciones de estos métodos, por ejemplo, la aplicación de capas de unión sobre superficies en las que se aplicaron previamente ráfagas de granos de arena; o bien, si se realizan las ráfagas de granos de arena sobre superficies con macrorugosidad.

Una superficie apropiadamente limpia y con rugosidad da una interfase crítica sobre la cual la primera capa de recubrimiento fundido o partículas de recubrimiento ablandado impactan. Una superficie apropiadamente preparada tiene los siguientes atributos:

- La limpieza da un contacto metal con metal para las interacciones interatómicas y metalúrgicas entre el sustrato y las partículas proyectadas.
- El aumento de área superficial. La rugosidad da un aumento significativo de área de la superficie para el contacto partícula con sustrato, y aumenta la interacción atómica y metalúrgica.
- Asperezas superficiales e irregularidades. La rugosidad da muchas oportunidades para anclaje mecánico
- La macrorugosidad reduce los esfuerzos en el plano del recubrimiento por la introducción de pliegues en el mismo mediante la rugosidad creada al sustrato.

### *RÁFAGAS DE PERDIGONES EN SECO.*

Es la técnica para la creación de la rugosidad superficial más empleada. Las partículas de abrasivo son propulsadas hacia el sustrato a velocidades relativamente altas. En el impacto con el sustrato, las puntiagudas y anguladas partículas actúan como cinceles, cortando pequeñas irregularidades de la superficie como muestra la figura 3.4.

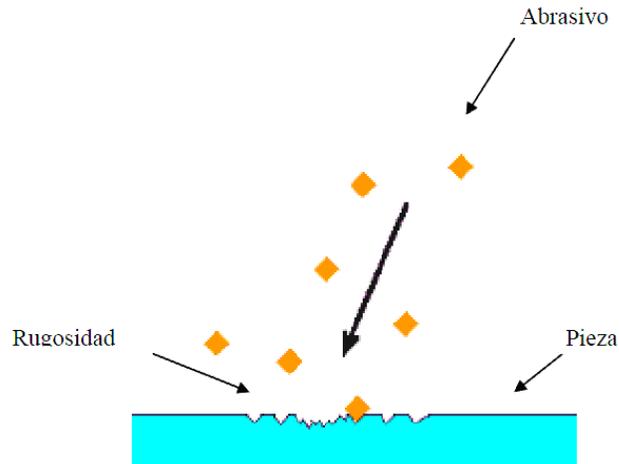


Figura 3.4 Creación de rugosidad impactando partículas de abrasivo sobre la superficie.

La cantidad de deformación del sustrato es función de lo angulado de las partículas, tamaño, densidad y su dureza; además de la velocidad y ángulo con la que son dirigidas hacia el sustrato. La acción de los granitos de arena causa deformación plástica irreversible del material del sustrato. El material que está debajo del material de la superficie deformada se mantiene elástico y trata de regresar la superficie del material deformado a su longitud original. El resultante balance de fuerzas sitúa a las capas externas de material en esfuerzos residuales de compresiones mientras que las capas inmediatas inferiores de material se encuentran a tensión.

Las irregularidades en una superficie perfectamente tratada con chorro de perdigones tendrán un gran número de huecos, los cuales proveen parcialmente de un espacio en el que las partículas fundidas pueden fluir. Los recubrimientos proyectados hacia esta superficie son anclados, creando lo que comúnmente se conoce mecánicamente como unión por enclavamiento o anclaje.

#### *EQUIPO USADO PARA LA ABRASIÓN CON RÁFAGAS DE PERDIGONES.*

Hay tres tipos básicos de equipos:

- Máquinas a presión o “generadores de ráfagas”.
- Cabinas para ráfagas con boquillas de tipo succión.
- Máquinas de ráfaga centrífugas o “libres de aire”.

Máquinas a presión. Son usadas generalmente para trabajos exteriores, proveen de velocidades de abrasión más grandes y usan el aire más eficientemente que las de alimentación tipo succión. Ver las figuras 3.5.

Para trabajos en interiores de piezas grandes los generadores de presión son usados en cámaras especiales.

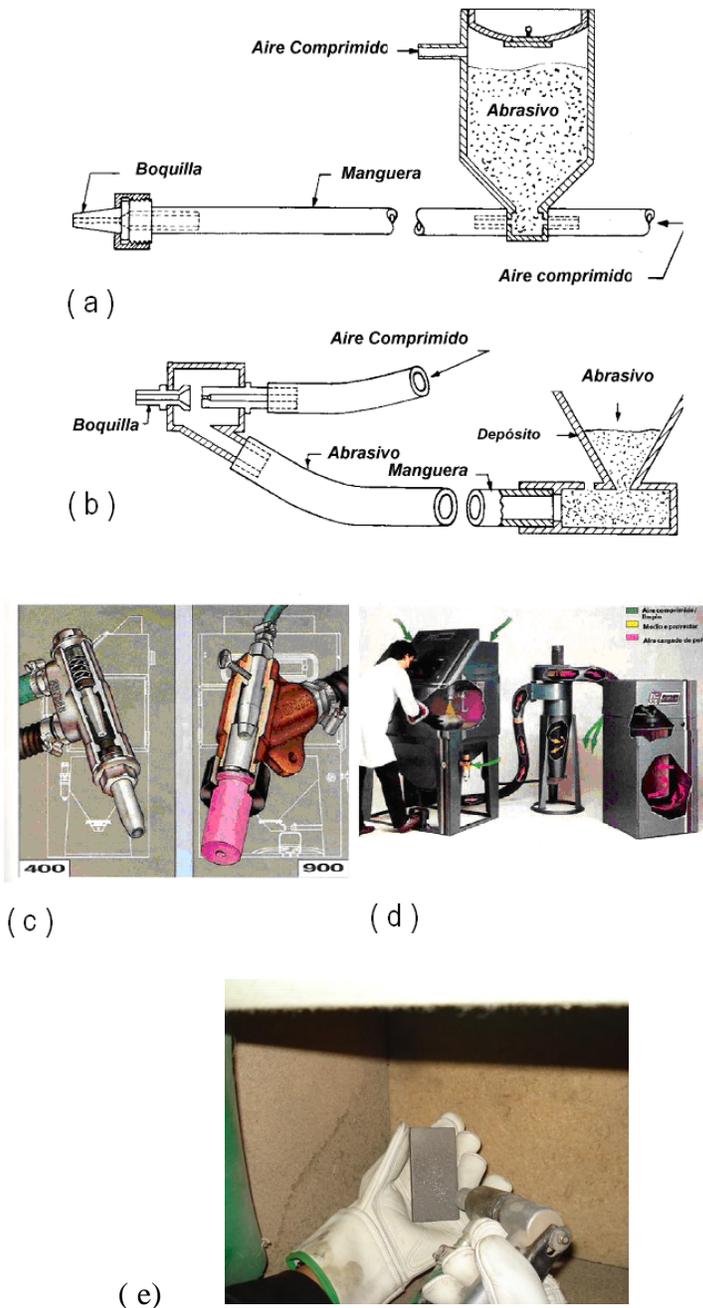


Figura 3.5 Equipo para abrasión: (a) Por succión. (b) Máquinas de granallado. (c) Pistola de sand-blast. (d) Equipo de granallado. (e) Granallado.<sup>55</sup>

Cabinas para ráfagas. Usualmente emplean boquillas de tipo succión (figura 3.6 a)). Estas no proveen de tan altas velocidades de abrasión como los generadores de presión, y son menos eficientes con respecto al uso del aire; de cualquier forma, son muy convenientes

<sup>55</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 112; Laboratorio de Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

para trabajos pequeños. Las partículas abrasivas son reutilizables y el operador no requiere de ropa protectora especial.

Máquinas de ráfaga centrífuga. Son idealmente situadas para la producción de ráfagas. Con este equipo, las partículas son puestas en un ventilador contra el sustrato por una rápida rueda revolvente alabeada. Este tipo de equipo es mucho más eficiente que los generadores de ráfagas de tipo aire en términos de energía utilizada.

#### ABRASIVOS.

Granalla angulada de hierro templado. Es el abrasivo más usado para máquinas de presión en cabinas, tiene una dureza de 60 a 62 HRC, y puede ser usada en sustratos de materiales tan duros como 40 a 45 HRC. La granalla de hierro templado se mantiene afilada más tiempo y se fractura durante su uso para producir nuevos y afilados lados cortantes. En muchas aplicaciones una mezcla de tamaños de grano es más eficiente que un solo tamaño.

Alúmina ( $Al_2O_3$ ). Este tipo de granos trabajan bien en cabinas. La gravedad específica de la alúmina es la mitad de la granalla de hierro templado, por ello este tipo de abrasivo es tomado por la alimentación de succión y es acelerada efectivamente a través de la boquilla. El rango de fractura no es excesivo, excepto cuando se usan presiones de aire muy elevadas contra sustratos de acero endurecido o algunos otros muy duros.

La alúmina, fundida y pura, es extremadamente dura y cuando es apropiadamente triturada adquiere lados filosos. Hay dos grados, C (áspero) y F (fino). Una buena proporción de partículas para usos generales podría ser una mezcla 50/50 de grado C y F, con pequeñas adiciones periódicas de grado C para mantener un rango de mezcla balanceado. Granos de alúmina de malla 240 figura 3.6 a) y 150 figura 3.7 b) se muestran a continuación.



a)



b)

Figura 3.6 Partículas de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ). 130X, (a) malla 240. (b) malla 150.<sup>56</sup>

Los granos de alúmina pueden ser usados en superficies demasiado duras (superiores a 45 HRC) y materiales no ferrosos donde los granitos de acero podrían causar problemas de corrosión.

<sup>56</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 114

Arena sílica. Es ampliamente usada para trabajos en exterior y para buen grado de limpieza. La arena ofrece ventajas a bajo costo y disponibilidad. La principal desventaja es el riesgo de adquirir silicosis, por lo que se requiere protección respiratoria.

Pedernal molido. Está disponible en todos los tamaños de malla, algunos usuarios opinan que las piedras molidas es un método superior a la arena sílica, dado que es más limpio, las partículas son anguladas y filosas. La piedra es un tipo de sílica y precauciones apropiadas deberán ser tomadas por el riesgo de silicosis.

Granate molido. Su composición varía ampliamente, algunos grados contienen sílica libre por lo que se requiere protección respiratoria. El rango de fractura varía con el granate. Algunos grados son libres de polvo mientras que otros producen demasiado. Este tipo de abrasivo da un excelente trabajo.

Carburo de silicio (SiC). Está disponible en varios tamaños de malla, pero para aplicaciones de recubrimientos donde altas temperaturas son encontradas no es recomendable por su reactividad con varios materiales de sustratos y recubrimientos.

Escoria molida. Son granitos negros y vidriosos hechos de la escoria que se produce por varios tipos de hornos. La escoria molida es angulada y se tienen disponibles muchos tamaños de malla.

### *3.5 INICIO DE LA PROYECCIÓN.*

Siempre es bueno comenzar la proyección térmica de un componente lo más pronto posible después de completada la preparación de la superficie. El recientemente expuesto metal limpio es metalúrgicamente activo y susceptible de contaminarse. Las huellas digitales o el contacto con materiales externos pueden afectar severamente la adhesión del recubrimiento.

### *3.6 APLICACIÓN DE UNA CAPA DE ADHESIÓN.*

Es otro método para obtener una superficie rugosa y texturizada. Los recubrimientos de adhesión especialmente diseñados tienen muchos atributos que los hacen ideales para la preparación de superficies.

A menudo son auto-adheribles; esto es, se adhieren a superficies lisas reaccionando con el sustrato para formar capas de aleaciones microscópicas que no dependen de un enclavamiento mecánico normalmente ocurrido con la rugosidad superficial. Los recubrimientos que no son auto-adheribles requieren de un baño de partículas fino o en casos raros, de un precalentamiento de alta temperatura. Pueden aceptar maquinado o esmerilado para biselar sin despegarse.

### *MATERIALES CON LOS QUE LAS CAPAS DE ADHESIÓN SON AUTO-ADHERIBLES*

- Todos los aceros comunes.
- Aceros inoxidables, series 300 y 400.
- Aceros aleados endurecidos.
- Monel (aleación de níquel y cobre).
- Cromo y sus aleaciones.
- Hierro fundido.
- Acero fundido.
- Titanio y sus aleaciones.

### *MATERIALES EN LOS QUE LAS CAPAS DE ADHESIÓN NO SON AUTO-ADHERIBLES.*

- Aluminio y sus aleaciones.
- Cobre y algunas de sus aleaciones de alto cobre.
- Molibdeno.
- Tántalo.
- Niobio.
- Tungsteno.
- Polímetros.
- Papel.
- Madera.
- Vidrio.
- Cerámicos.

### *MECANISMO DE ADHESIVIDAD.*

El mecanismo por el cual los recubrimientos por proyección térmica se adhieren a sustratos metálicos no ha sido estudiado extensivamente. Sin embargo, de los muchos mecanismos propuestos, solo la fusión-difusión ha sido demostrada para recubrimientos auto-adheribles. Las partículas calientes primero impactan el sustrato, aumentará localmente la temperatura del metal inmediatamente debajo de la zona de impacto de la partícula hasta un punto donde la partícula y el sustrato interactúan.

Si el calor disponible es suficientemente elevado para fundir el sustrato, la fusión con la partícula ocurrirá para formar capas de aleaciones microscópicas. Si no ocurre la fusión, la interacción puede ser caracterizada por difusión de alta temperatura en estado sólido; de nuevo resultando en una capa de unión aleada.

El grado en que la fusión-difusión toma lugar depende parcialmente de la metalurgia del recubrimiento y del sustrato además de la temperatura de precalentamiento. El calentamiento del sustrato a altas temperaturas antes de proyectar el recubrimiento incrementa la probabilidad de una fusión microscópica y/o que ocurra la difusión.

Inversamente, de poco a nulo calentamiento reduce la interacción partícula-sustrato. El uso de altas temperaturas de precalentamiento para ayudar a la adhesión debe ser evaluada contra la formación de óxidos, lo cual también disminuye la adhesión del recubrimiento.

### 3.7 ¿POR QUÉ USAR UNA CAPA DE ADHESIÓN?

- Se requiere una preparación de superficie mínima. Un maquinado o esmerilado después de la limpieza es todo lo que se necesita. Esto es especialmente útil en sustratos delgados donde las ráfagas de perdigones pueden causar algún daño.
- Para una seguridad adicional contra fallas de adhesión, se usa una capa de adhesión sobre la superficie a la cual ya se le aplicaron las ráfagas de perdigones. Una mejor unión metalúrgica combinada con un mejor anclaje mecánico se provee de esta manera.
- Se usa a conveniencia cuando se manejan piezas grandes.
- Se usa para sustratos duros a los que no se les puede crear efectivamente rugosidad por ráfagas de perdigones.
- Se usa para protección del sustrato.
- Se usa para ayudar a compensar diferencias en coeficientes de expansión térmica entre las capas superiores de cerámicos y los sustratos metálicos
- Cuando las capas superiores tienen una limitación de espesor, los recubrimientos de adhesión pueden aplicarse para crear un espesor extra.

Las capas de adhesión pueden ser de 75 a 125  $\mu\text{m}$ . Muchos materiales de capas de adhesión pueden ser aplicados como una solución de recubrimiento para restauración dimensional.

#### DISPONIBILIDAD DE MATERIALES DE CAPAS DE ADHESIÓN.

Las capas de adhesión pueden ser aplicadas por combustión por alambre y polvo, plasma y HVOF. Algunos materiales típicos se muestran en la tabla 3.1:

RECUBRIMIENTO	ALAMBRE	POLVO	TEMPERATURA DE SERVICIO, °C
Molibdeno	Sí	Sí	315
80Ni-20Al	No	Sí	845
90Ni-5Mo-5Al	No	Sí	.....
95Ni-5Al	Sí	Sí	845
95NiCr-5Al	Sí	Sí	980
95FeNi-5Al	Sí	Sí	1200
90FeNi-5Mo-5Al	No	Sí	650

Tabla 3.1 Materiales para capas de adhesión.<sup>57</sup>

<sup>57</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 116

### 3.8 SOCAVACIÓN.

Cuando las piezas serán reparadas, la superficie está dañada usualmente debido a desgaste y/o corrosión. Los procedimientos normales de reparación remueven el material de la superficie dañada por socavar el sustrato. La socavación remueve algo de material en buen estado así como el de la superficie dañada con el fin de proveer de una superficie plana y uniforme para aceptar el nuevo recubrimiento. Es importante recordar que la socavación reduce el área de sección transversal y correspondientemente reduce los esfuerzos a tensión y esfuerzo último. Los recubrimientos proyectados no restauran el esfuerzo a tensión original, aunque el área de sección transversal pueda ser restaurada. El área superficial que ha sido socavada puede ser preparada por ráfagas de perdigones, macrorugosidad o capa de adhesión, dependiendo de la profundidad de socavación y el material del recubrimiento escogido para proyectar.

### 3.9 ENMASCARAMIENTO.

Varias técnicas de enmascaramiento han sido desarrolladas para proteger áreas cercanas a la zona objetivo de los impactos de la proyección de partículas. La figura 3.7 muestra la protección de un área mediante este método.



Figura 3.7 Utilización de enmascaramiento para proteger la superficie.<sup>58</sup>

En los métodos se incluyen:

- Máscaras de sombras de metal.
- Cintas duras de alta temperatura, incluyendo silicón con dos lados pegajosos, resistentes a las ráfagas de perdigones y a la proyección por plasma, 3M-33 vinil negro para únicamente ráfagas de perdigones, 3M cinta estarcida para la aplicación anterior y resistencia a la proyección, y cinta rellena de vidrio para ambas aplicaciones.
- Compuestos de pintura para enmascarar.

---

<sup>58</sup> Enmascaramiento. Fuente: [www.itp-repair.com/process/metal\\_spraying.html](http://www.itp-repair.com/process/metal_spraying.html)

### *3.10 PRECALENTAMIENTO.*

El precalentamiento de los sustratos antes de la proyección térmica es una práctica normal y aceptable. Para evitar problemas, deben considerarse muchas precauciones y limitaciones.

El precalentamiento elimina humedad del área objetivo y presenta una superficie tibia y seca para las primeras partículas que impactarán. El precalentamiento ayuda también a preexpandir el sustrato y subsecuentemente se contrae con el recubrimiento, reduciendo los esfuerzos residuales creados en el recubrimiento durante el enfriamiento.

#### *TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO.*

Como regla general, el calentar a temperaturas de entre 100 y 150 °C por aproximadamente 60 segundos es suficiente para remover la humedad. Las partículas calientes fundidas o semifundidas se entibian menos rápido, fluyen y se adhieren mejor cuando impactan una superficie tibia y seca que una fría.

#### *EQUIPO.*

Una flama sobre el sustrato es usada comúnmente para precalentar, sin embargo pueden utilizarse hornos y cuartos con temperatura con humedad inferior al 30%.

#### *MATERIALES QUE NO DEBEN SER PRECALENTADOS.*

En materiales como aluminio y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, titanio y aleaciones de magnesio, el daño causado por el precalentamiento es mayor que los beneficios obtenidos. Las superficies recién preparadas actúan como captadoras de oxígeno y de manera rápida crecen las capas de óxido que sirven para inhibir la interacción metal con metal. El precalentamiento acelera el crecimiento de las capas de óxido, lo que interfiere con la adhesión del recubrimiento. Para estos metales se sugiere usar limpieza, secado y cuartos de temperatura.

#### *ACERO INOXIDABLE, SUPERALEACIONES Y ALEACIONES BASE NÍQUEL.*

Se precalientan mejor a 100 °C o menos, de manera rápida seguida de la aplicación de la primera pasada de material de recubrimiento. Lo anterior se recomienda porque estos materiales y aleaciones forman óxidos refractarios que interfieren con el mecanismo de adhesión.

#### *ATMÓSFERAS INERTES.*

Proyectar bajo atmósferas inertes o en cámaras a baja presión representa una ventaja para precalentamientos a muy altas temperaturas dado que minimizan los efectos del oxígeno.

## CAPÍTULO 4. OPERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA.

### 4.1 PATRÓN DE ROCIADO.

Las operaciones, los parámetros y variables de los procesos para la obtención de recubrimientos por proyección térmica incluyen:

- Patrón de rociado.
- Control en el aumento del espesor del recubrimiento.
- Variaciones en el proceso derivadas de la geometría de la pieza a recubrir.
- Control de la temperatura en la intercara recubrimiento-sustrato.
- Movimiento relativo entre la antorcha y el sustrato.
- Eficiencia de deposición.

### FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DEL PATRÓN DE ROCIADO.

A medida que el patrón de rociado se desarrolla, su composición y variaciones son aspectos fundamentales para el entendimiento de los recubrimientos por proyección térmica. Sin importar qué equipo y material para proyectar se emplee, todos los procesos de proyección térmica involucran partículas fundidas o semifundidas, las cuales viajan a cierta velocidad arrastradas por una corriente de gas para impactarse sobre una superficie con el fin de formar un recubrimiento, lo anterior es mostrado en la figura 4.1. Las trayectorias de las partículas, su tamaño, su temperatura y su grado de derretimiento en cualquier momento de su estancia en la corriente de gas constituyen el patrón de rociado.

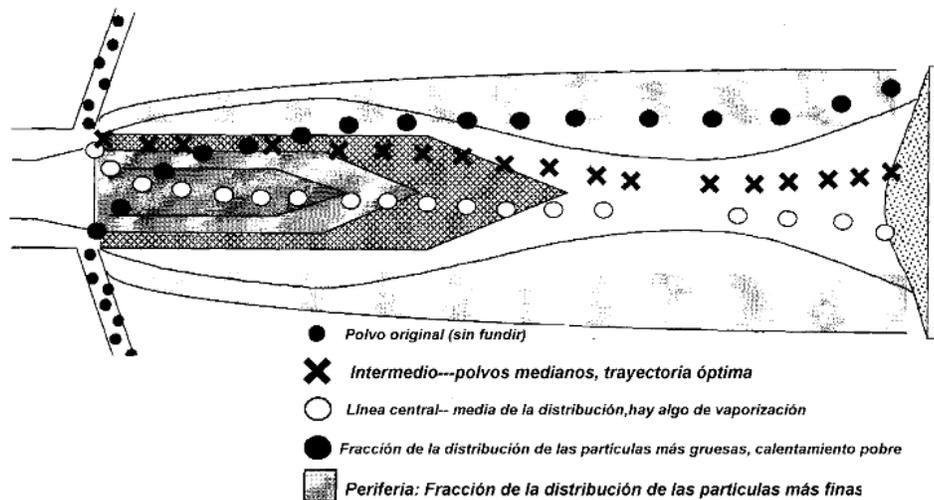


Figura 4.1 Trayectoria de las partículas en un proceso de proyección por plasma.<sup>59</sup>

<sup>59</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 120

La figura 4.1 muestra las trayectorias de las partículas en su viaje por la corriente de un chorro de plasma. En dicha figura, las partículas se inyectan de manera radial a la corriente del chorro. Sin embargo, la forma en que son inyectadas dichas partículas no influye en el patrón de rociado. En esta figura, algunas partículas viajan a través de la línea central del chorro, otras toman una posición intermedia y otras viajan en la periferia del chorro. Las partículas más finas viajan en la periferia, y de hecho nunca se introducen en el chorro. Las partículas más gruesas pueden fluir a través del chorro y tomar una posición alejada de su punto de inyección.

Las partículas ubicadas en cualquier posición en el chorro, impactarán virtualmente al mismo tiempo, formando de este modo el llamado patrón de rociado del recubrimiento en el sustrato.

La figura 4.2 muestra un corte transversal del patrón de rociado. En una vista paralela a la superficie del sustrato el patrón de rociado tiene una forma oval o circular. Los depósitos más rápidos y densos se forman debido a la acción de la parte central del chorro, lugar en el que se tiene una mayor fracción de la distribución de partículas y un mayor grado de derretimiento de éstas. Mirando de manera radial a partir del centro del patrón, encontramos un aumento en la porosidad debido a la presencia de las partículas más gruesas (quizá semifundidas) y a la acción de ángulos de impacto menores a  $90^\circ$ .

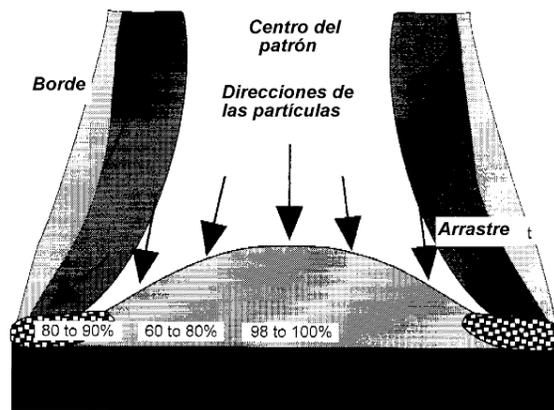


Figura 4.2 Patrón de rociado, se ilustra la deposición de las partículas.<sup>60</sup>

En la periferia del patrón, las partículas más finas se oxidan debido a su contacto con el aire formando una corona de desperdicios. La oxidación de las partículas más finas es muy rápida, y en ocasiones completa, formando de este modo la principal causa de la presencia de inclusiones de óxido en los recubrimientos por proyección térmica.

El fenómeno del patrón de rociado descrito en la figura 4.2 se aplica a todos los procesos de recubrimientos por proyección térmica descritos. Las variables de entrada al sistema comunes para todos los procesos (como el tipo de gas, la densidad y velocidad, la energía calorífica empleada, la distribución en el tamaño de las partículas, la gravedad específica de

<sup>60</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 121

éstas y los flujos de gas de arrastre) pueden, sin embargo, combinarse para cambiar la distribución de la porosidad, las partículas sin fundir y los óxidos. El tamaño y la geometría general del patrón de rociado también varían de proceso a proceso.

#### 4.2 CONTROL EN EL AUMENTO DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

##### 4.2.1 MICROESTRUCTURA TÍPICA DEL RECUBRIMIENTO.

Cuando las partículas al interior de un patrón de rociado típico llegan al sustrato que está siendo recubierto, recubrirán tanto las áreas densas y de buena calidad así como las impurezas típicamente encontradas en la periferia del patrón de rociado obtenidas en la pasada anterior. Después de varias pasadas, el recubrimiento lucirá como se ilustra en la figura 4.3.

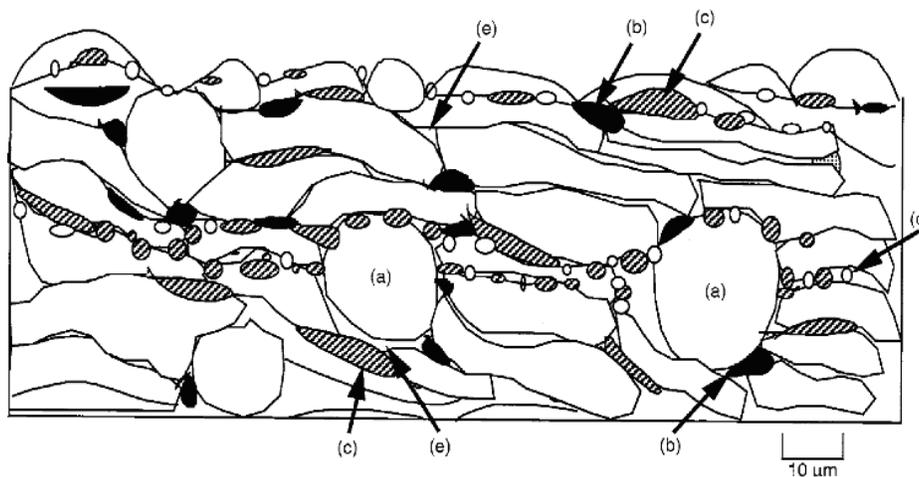


Figura 4.3 Estructura típica, contiene: (a) Partículas sin fundir. (b) Óxidos. (c) Impurezas. (d) Partículas finas. (e) Porosidad.<sup>61</sup>

En dicho corte transversal se muestran todos los tipos de partículas anteriormente descritas así como otros fenómenos encontrados normalmente en el patrón de rociado: porosidad, partículas sin fundir, óxidos, impurezas, residuos, y partículas finas periféricas, distribuidas en el espesor del recubrimiento a partir de la intercara del sustrato hasta la superficie del recubrimiento.

##### 4.2.2 EFECTO DE LA GEOMETRÍA EN EL AUMENTO DE ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

Los residuos, impurezas y óxidos periféricos se reducen cuando el rociado tiene lugar sobre áreas pequeñas. Este efecto se ilustra en la figura 4.4.

<sup>61</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 121

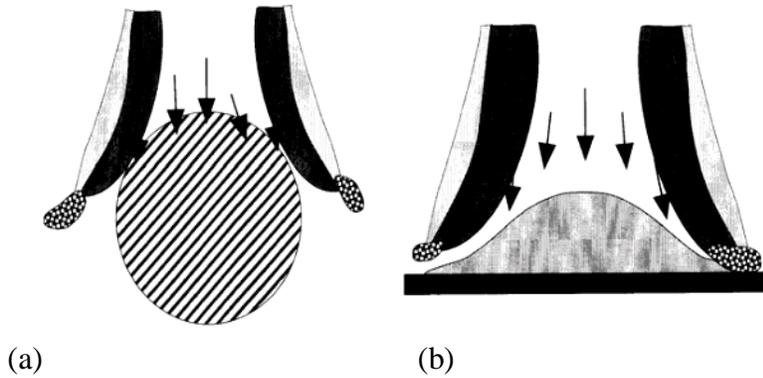


Figura 4.4 Geometría afectada por la deposición del recubrimiento: (a) En una superficie esférica se desechan las impurezas. (b) Se colectan todas las impurezas y óxidos.<sup>62</sup>

El diámetro de la barra circular siendo recubierta es menor que el diámetro del patrón de rociado. En consecuencia, una mitad de las impurezas periféricas del patrón de rociado no es depositada sobre dicha pieza de trabajo. En cambio, la placa es más larga que el diámetro del patrón y en consecuencia captura al patrón entero.

#### 4.3 USO DE DISPOSITIVOS DE ENFRIAMIENTO POR AIRE PARA MINIMIZAR LAS IMPUREZAS.

Para rociar áreas grandes, un dispositivo auxiliar de enfriamiento por aire se ensambla en la antorcha de rociado. Dicho dispositivo, además de enfriar y mantener a una temperatura aceptable a la pieza de trabajo, también sirve para remover impurezas superficiales mediante su acción de soplado. La figura 4.5 ilustra la acción descrita con anterioridad para una pieza en rotación.

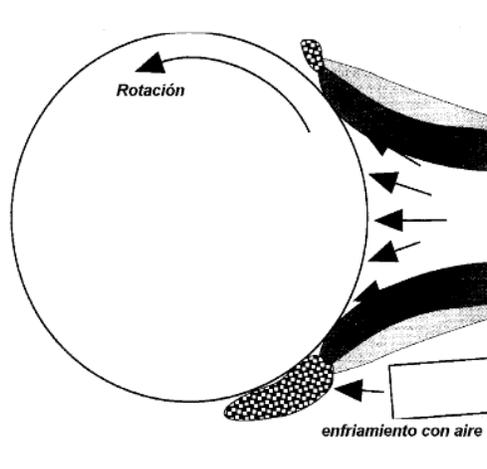


Figura 4.5 Posición de dispositivo de enfriamiento, eliminando impurezas en la superficie antes del rociado.<sup>63</sup>

<sup>62</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 122

<sup>63</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 122

#### *4.4 RELACIÓN ENTRE EL GRADO DE FUSIÓN DE LAS PARTÍCULAS Y LA ESTRUCTURA DEL RECUBRIMIENTO.*

Las partículas en el centro del patrón del rociado pueden incluir uno o todos los siguientes estados al momento de su impacto:

- Completamente fundidas, o por encima de su temperatura de fusión.
- Sobrecalentadas, muy por encima de su temperatura de fusión y tal vez cercanas a su punto de vaporización.
- Semifundidas, con líquido alrededor de un núcleo sólido.
- Fundidas y resolidificadas durante su trayecto anterior al impacto.

##### *4.4.1 CONTROL DE TEMPERATURA SUSTRATO/RECUBRIMIENTO.*

Cuando el precalentamiento del sustrato se ha completado y la proyección térmica ha comenzado, es necesario el control de la temperatura del sustrato y del recubrimiento para evitar la posible degradación, la oxidación y la contracción / expansión del sustrato.

##### *4.4.2 DEGRADACIÓN DEL SUSTRATO.*

Para aquellos materiales susceptibles de cambios físicos a altas temperaturas, un daño irreparable puede ser infligido cuando la temperatura no es controlada. Las propiedades físicas (por ejemplo dureza) establecidas en tratamientos térmicos son las que más fácilmente pueden ser alteradas.

##### *4.4.3 OXIDACIÓN.*

Las capas de recubrimiento depositadas y aprobadas para alcanzar altas temperaturas durante el rociado pueden oxidarse (se vuelven negras). Los óxidos entonces formados generan un plano debilitado en el recubrimiento que puede provocar la delaminación del recubrimiento bajo la aplicación de esfuerzos. La temperatura crítica de oxidación para cada material varía, sin embargo, manteniendo la superficie a temperaturas de 100 a 200°C, se tiene una buena regla general cuando se rocía al aire libre.

##### *4.4.4 CONTRACCIÓN / EXPANSIÓN.*

Los recubrimientos por proyección térmica se contraen en cuanto se enfrían, creando la presencia de esfuerzos cortantes en el sustrato y provocando la combadura y la posible delaminación del recubrimiento, lo cual se ilustra en la figura 4.6.

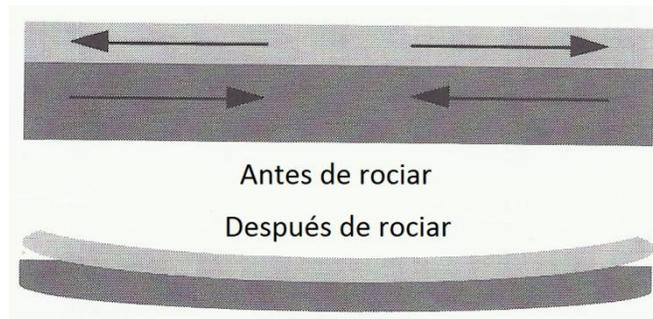


Figura 4.6 Efecto del material que se contrae después del rociado.<sup>64</sup>

Los materiales del sustrato que tienen un alto coeficiente de expansión térmica que tienden a expandirse debido a altas temperaturas presentes durante la proyección térmica pueden experimentar una mayor delaminación en la intercara recubrimiento-sustrato.

La manera usual para solucionar el problema del sobrecalentamiento recubrimiento-sustrato es el uso de enfriadores de aire. Cuando se encuentran apropiadamente posicionados, es decir, cuando el chorro de aire no perturba al patrón de rociado, el sobrecalentamiento puede ser fácilmente controlado. No solo se emplea aire como medio de enfriamiento, también puede emplearse dióxido de carbono o nitrógeno líquido cuando es necesario un enfriamiento extremo.

Cuando el rociado se efectúa bajo una atmósfera inerte, el gas noble puede también emplearse como medio de control de la temperatura y limpieza de impurezas.

#### 4.4.5 MOVIMIENTO ENTRE LA ATMÓSFERA Y EL SUSTRATO.

La proyección térmica es un proceso de líneas de visión. En consecuencia, para obtener una deposición óptima de los recubrimientos, el área del sustrato debe ser normal (a 90°) con relación al chorro de material fundido. El objetivo fundamental del movimiento de la antorcha y el sustrato es presentar el área objetivo con relación al chorro de un estado estable, consistente y de manera repetible, siempre manteniendo el mismo ángulo antorcha-sustrato, la distancia de rociado o stand-off y el movimiento relativo. Lo anterior puede ser tan simple como mantener una parte en rotación y la antorcha estacionaria, o tal vez moviendo la parte horizontalmente a una velocidad estable, o puede involucrar arreglos más complejos en aquellas situaciones en donde el movimiento relativo debe ajustarse para rociar, por ejemplo, los asimétricos álabes para turbinas o superficies cónicas.

#### 4.5 CONTROL DE LAS VARIABLES DE MOVIMIENTO.

El movimiento relativo de la antorcha (patrón de rociado) y el área objetivo (sustrato) es crítico para una deposición continua y lo más uniformemente posible de las pasadas de rociado para la formación de capas acumulativas de recubrimiento. A continuación se muestran las variables críticas en el control de movimiento:

<sup>64</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 125

#### *4.5.1 DISTANCIA BOQUILLA-SUSTRATO (STAND-OFF).*

Una vez establecida la distancia de rociado, se debe mantener constante para el resto de la operación de recubrimiento. El control de la distancia de rociado asegura que esencialmente el mismo recubrimiento va a ser depositado a través del área objetivo total de la pieza de trabajo y mantiene una uniformidad casi total en el espesor final del recubrimiento.

#### *4.5.2 PATRÓN DE ROCIADO NORMAL AL SUSTRATO.*

Rociar de manera normal al sustrato es muy deseable, pero a pesar del ángulo elegido, éste debe mantenerse constante en el transcurso de la operación completa a pesar del movimiento de la parte o la antorcha. Típicamente,  $90^\circ \pm 20^\circ$  es una variación aceptable en caso de ser necesario.

#### *4.5.3 CONSUMO DEL MATERIAL DE ALIMENTACIÓN.*

El consumo del material de alimentación establece la tasa de deposición del recubrimiento mientras el patrón de rociado pasa sobre el sustrato. Si la tasa de rociado cambia durante el proceso, el espesor del recubrimiento será bastante irregular repercutiendo en las propiedades deseables en éste. La tasa de rociado, y por ende el consumo del material de alimentación, debe ser balanceada con la energía de entrada para que el recubrimiento alcance sus propiedades óptimas. Un cambio en la tasa de rociado mientras la energía de entrada permanece constante, puede afectar el grado de derretimiento de las partículas y la generación de splats, el contenido de óxido, la porosidad, la resistencia de adhesión y la eficiencia de deposición.

#### *4.5.4 MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE LA PIEZA DE TRABAJO Y LA BOQUILLA.*

El movimiento relativo entre la antorcha y la pieza de trabajo debe manejarse de tal manera que se obtenga un espesor uniforme y consistente en cada placa aplicada sobre el sustrato.

Como una regla general, debe aplicarse material para conseguir  $25\mu\text{m}$  de espesor de recubrimiento por pasada. Por lo tanto, para obtener un recubrimiento de  $250\mu\text{m}$  se requieren 10 pasadas. La regla de los  $25\mu\text{m}$  no es estricta, pero es una buena aproximación para los principiantes en estos procesos. El espesor de la capa rociada por pasada elegida puede variar y ocurre frecuentemente cuando se trata de adecuar al tipo de material de alimentación, dimensiones de la pieza de trabajo, y el proceso de proyección térmica empleado. De este modo, menos de  $12.5\mu\text{m}$  por pasada se usa en recubrimientos resistentes al desgaste y más de  $125\mu\text{m}$  por pasada se usa en recubrimientos porosos desgastables por rozamiento.

#### *4.5.5 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE BARRIDO.*

Para determinar la velocidad del movimiento relativo entre la parte y la antorcha, hay que considerar que cada pasada de la antorcha sobre la superficie deja una banda de recubrimiento depositado como muestra la figura 4.7.

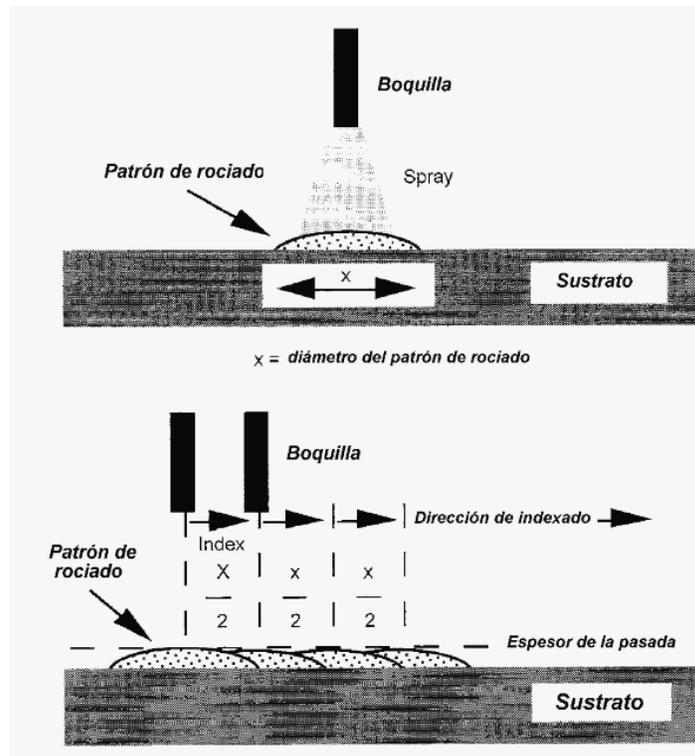


Figura 4.7 Obtención de capas de recubrimiento permitiendo que el material se deposite antes de cada pasada.<sup>65</sup>

Una capa uniforme resulta cuando el patrón de rociado se deposita uniformemente a través de la superficie objetivo. Ajustando el movimiento relativo entre la antorcha y el sustrato de tal manera que el patrón de rociado se indexe a aproximadamente un medio del diámetro del patrón de rociado para cada pasada sobre el área objetivo, se traslaparan los patrones de rociado. En consecuencia, se producirá una capa uniforme.

Un ciclo a través de la superficie del sustrato produce una capa completa, capas múltiples producen el espesor deseado. Sobre una superficie plana, lo anterior puede conseguirse mediante el movimiento de la antorcha sobre los ejes X-Y de un plano paralelo a la superficie del sustrato, estando éste en forma estacionaria. Después de que la antorcha se traslada en dirección X a través de la superficie, se indexa ésta en la dirección Y para la siguiente pasada adyacente, y de este modo se repite la secuencia para recubrir la totalidad de la superficie del sustrato. Para objetivos en rotación, (en concreto, cuando un cilindro es rociado) la antorcha debe moverse continuamente en un solo eje paralelo al eje de rotación de la pieza. Para cada revolución del sustrato, la antorcha debe ser indexada un medio del diámetro del patrón de rociado. Esto se muestra en la figura 4.7. Si la tasa de rotación del sustrato y la tasa de movimiento transversal de la antorcha tienen una relación inadecuada, el depósito del recubrimiento puede presentar estrías o zonas discontinuas por cada pasada.

<sup>65</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 125

El control de las variables de movimiento anteriormente mencionado mediante la automatización es una gran necesidad. Una apropiada ejecución de la manipulación del movimiento entre la antorcha y el sustrato, acompañado de un estricto control de estas variables requiere generalmente de equipos de manipulación automática y robótica, así como de sistemas de control programable y/o computarizado. La automatización es el único método confiable para asegurar la repetibilidad y consistencia entre parte y parte obtenidas. Sin importar el qué tan bien entrenado esté un operador, es posible que el individuo no pueda dar la misma calidad del recubrimiento de un momento a otro.

#### *4.5.7 EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN.*

Cada una de las variables discutidas anteriormente (movimiento entre la antorcha y el sustrato, la distancia de proyección, el ángulo y la tasa de rociado) cuando se combinan con los parámetros del proceso de proyección térmica y la geometría del sustrato, influyen directamente en la tasa de deposición y la calidad del recubrimiento. La eficiencia de deposición es una medida idealizada del porcentaje de partículas introducidas en el chorro caliente para ser depositadas en un sustrato plano.

La eficiencia de deposición solamente es útil cuando su extensión brinde una medida para optimizar los parámetros de la antorcha. Una eficiencia de deposición es crítica y deseable, debido a que asegura que el recubrimiento depositado bajo condiciones ideales refleja la intención diseñada del material de alimentación inicial. Una baja eficiencia de deposición sugiere que una porción del material de alimentación inicial no está siendo depositada. Dicha porción puede constar de partículas burdas, partículas finas, o quizá de una mezcla de ambas. Las bajas eficiencias de deposición son también menos económicas, incurriendo en un aumento en los tiempos de operación y por consiguiente costos más elevados para obtener recubrimientos delgados.

#### *4.5.8 CÁLCULO DEL CONSUMO ESTIMADO DE MATERIAL A PROYECTAR Y CÁLCULO DE LA TASA DE PRODUCCIÓN.*

El costo de los materiales a rociar se calcula conociendo los requerimientos del recubrimiento, por ejemplo, el espesor final, el área a recubrir y la eficiencia de deposición del proceso empleado. Los números en la tabla 4.1 se pueden utilizar para calcular el material requerido por una aplicación o una tasa de producción (tiempo de rociado).

Material	Peso del recubrimiento* (lbs/ft <sup>2</sup> /0.001")	Material Eficiencia	Requerido* de deposición	
		40%	60%	80%
Aluminio	0.013	0.033	0.022	0.016
Aluminio-Bronce	0.033	0.083	0.055	0.042
Alúmina(+2% de óxido de titanio	0.017	0.043	0.028	0.021
Zirconato de calcio	0.021	0.053	0.035	0.026
Oxido crómico	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
80/20 Níquel-cromo	0.038	0.095	0.063	0.048
Níquel-cromo (16% cromo)	0.039	0.098	0.065	0.049
Acero Inoxidable (17% Cr, 12% Ni)	0.035	0.088	0.058	0.044
Acero	0.036	0.09	0.06	0.045
Óxido de titanio	0.021	0.053	0.035	0.026
Tungsteno	0.088	0.22	0.147	0.11
Carburo de tungsteno (12% Co)	0.064	0.16	0.107	0.08
Carburo de tungsteno (17% Co)	0.057	0.143	0.095	0.071
Carburo de tungsteno (46% Ni, 35% Ni-Co, 11% Cr)	0.043	0.108	0.072	0.054
Carburo de tungsteno (33% Ni, 50% Ni-Co, 9% Cr)	0.048	0.12	0.08	0.06
Zinc	0.039	0.098	0.065	0.049
Zinc-aluminio(85/15)	0.035	0.088	0.058	0.044
Óxido de zirconio	0.028	0.07	0.047	0.035

\* multiplicar por 19.2 para convertir a kg/m<sup>2</sup>/100 micras

Tabla 4.1 Valores para cálculos de tasa de producción.<sup>66</sup>

<sup>66</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY.

La tabla 4.2 aplica para grandes superficies metálicas planas previamente granalladas. Para componentes pequeños y de geometría compleja duplicar los valores de la tabla.

Material	Peso en onzas requeridas para depositar 0.001" en 1 ft <sup>2</sup> del sustrato
Estaño	0.9
Zinc	0.9
Zinc-aluminio (85/15)	0.8
Aluminio	0.25
Bronce	0.9
Cobre	0.9
Acero	0.8

Tabla 4.2 Peso necesario de alambre para recubrir un pie cuadrado de sustrato con recubrimiento de 0.001" de espesor.<sup>67</sup>

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo utilizando dichas tablas:

Consideraciones:

- Área: 400 ft<sup>2</sup> de superficie por recubrir.
- Factor de protección: 10% de sobrerociado debido a barrenos y bordes.
- Material: Acero inoxidable rociado mediante arco eléctrico.
- Espesor: 0.1" de espesor del recubrimiento.
- Eficiencia: 70% de eficiencia de deposición.
- Tasa de rociado: 60lbs/hr.
- Tiempo: 80% del tiempo efectivo de rociado.

Por lo tanto, la cantidad de material requerido en libras es:

$$\frac{(\text{Superficie por recubrir}) (\text{Espesor deseado en milésimas de pulgada}) (\text{Peso del recubrimiento}^*)}{(\text{Factor de corrección por sobrerociado}) (\text{Eficiencia de deposición})}$$

\*Factor de Tabla 4.1

Sustituyendo los datos:

$$\text{Peso} = \frac{(400 \text{ ft}^2) (100 \text{ milésimas de pulgada}) (0.035 \text{ lbs/ft}^2/\text{milésimas de pulgada})}{(0.9) (0.7)} = 2222 \text{ lb.}$$

Alternativamente, usando la tabla 4.2:

$$\text{Peso} = \frac{(400 \text{ ft}^2) (100 \text{ milésimas de pulgada}) (0.8 \text{ oz/ft}^2/\text{milésimas de pulgada})}{(16) (0.9)} = 2222 \text{ lb.}$$

El costo total se determina cotizando el precio de la libra del material con un proveedor.

<sup>67</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY.

### *TIEMPO DE ROCIADO O TASA DE PRODUCCIÓN.*

El tiempo que tomará una operación de rociado se puede estimar (usando las consideraciones anteriores) así:

$$\text{Tiempo de rociado} = \frac{\text{Cantidad de material a rociar}}{(\text{Tasa de rociado}) (\% \text{ de tiempo efectivo de rociado})}$$

Tiempo de rociado = 46.3 horas.

### *4.6 SEGURIDAD DURANTE EL PROCESO DE RECUBRIMIENTO POR PROYECCIÓN TÉRMICA.*

Algunos riesgos a la salud y seguridad personal están presentes en los procesos de proyección térmica al igual que en la mayoría de los otros procesos industriales. En general, los riesgos asociados a la proyección térmica son similares a los encontrados en los procesos de soldadura. Los riesgos relacionados con el equipo se pueden evitar si se siguen las instrucciones de operación, las medidas de seguridad y de mantenimiento dictadas por los fabricantes de los equipos. El tener en óptimas condiciones las instalaciones eléctricas, ventilación, suministro de agua y manejo de gases y materiales también ayuda a evitar accidentes. A continuación se muestran tres principales riesgos asociados con los procesos de proyección térmica:

#### *POLVOS Y HUMOS.*

Todos los procesos para proyección térmica generan polvos y humos (los cuales contienen partículas finas inferiores a 5µm) y en ocasiones compuestos orgánicos volátiles tóxicos como benceno. Se debe utilizar un sistema de extracción de gases y un colector de polvos como el ilustrado en la figura 4.8.



Figura 4.8 Sistema de extracción de gases y un colector de polvos.<sup>68</sup>

Cuando los materiales que se rocían son tóxicos se recomienda el uso de mascarillas y respiradores.

<sup>68</sup> Extractor de gases y colector de polvos. Fuente: <http://www.gpaccion.com/page008.html>

## RUIDO

La naturaleza supersónica y turbulenta de los flujos en muchos procesos de proyección térmica genera altos niveles de ruido, los cuales varían dependiendo del proceso tal como se ilustra en la tabla 4.3.

PROCESO	NIVEL DE RUIDO. dBA
D-gun	>145
HVOF usando keroseno	>133
HVOF usando gases combustibles	125-127
Plasma	115-125
Flama alimentado con alambre	115-125
Arco eléctrico	105-125
Flama alimentado con polvos	90-110
Plasma en cámara de vacío o de atm. inerte	ambiental

Tabla 4.3 Variación de ruido dependiendo del proceso de proyección.<sup>69</sup>

El tiempo de exposición recomendada por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social a distintos niveles de ruido se ilustra en la tabla 4.4:

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE EXPOSICION	
NIVEL DE EXPOSICIÓN AL RUIDO	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
90 dB(A)	8 HORAS
93 dB(A)	4 HORAS
96 dB(A)	2 HORAS
99 dB(A)	1 HORA
102 dB(A)	30 MINUTOS
105 dB(A)	15 MINUTOS

Tabla 4.4 Tiempo de exposición recomendado dependiendo de los niveles de ruido.<sup>70</sup>

A continuación se muestra en la figura 4.9 un cuarto de aislamiento acústico. Nótese la instalación para ventilar y coleccionar polvos:

<sup>69</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY.

<sup>70</sup> Secretaría de Trabajo y Previsión Social. NORMA Oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001, Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido



Figura 4.9 Cuarto de aislamiento acústico.<sup>71</sup>

### *RADIACIÓN.*

El espectro de la luz emitida por los equipos de proyección térmica va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Por lo tanto, se debe tener una adecuada protección a la piel y los ojos para evitar quemaduras. Se recomienda usar lentes del número 9 al 12 cuando se trabaja con equipos de arco eléctrico y de plasma, mientras que en procesos como el HVOF o la proyección por plasma se requiere menor nivel de protección (del número 6 al 8).

Se recomienda que la ropa usada durante el proceso sea de color oscuro, pues las prendas claras permiten el paso de radiaciones que pueden ocasionar quemaduras en la piel.

Existen otros tipos de riesgos potenciales de los cuales aún se tiene poco entendimiento y tiene mucha difusión en materia de seguridad. Por lo tanto aún no se tiene una normatividad. Uno de ellos es la exposición a campos magnéticos intensos en equipos de plasma y arco eléctrico, y el otro es el infrasonido generado en los dispositivos de HVOF alimentados con keroseno. Respecto a este último, los operadores reportan sentir la vibración (sin poder escucharla) la cual les produce sensaciones desagradables en el estómago cuando se encuentran cerca de estos equipos.

---

<sup>71</sup> Aislamiento acústico. Fuente: <http://chillerservice.com>

## **CAPÍTULO 5. OPERACIONES POSTERIORES A LA APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO.**

Después de su aplicación, los recubrimientos reciben una serie de tratamientos y operaciones con el fin de establecer sus dimensiones finales y mejorar o cambiar su microestructura con el objeto de minimizar algunos de sus defectos. Las mejoras esperadas incluyen:

- Cambios microestructurales.
- Mejora en la resistencia de adhesión.
- Relación de los esfuerzos internos (residuales).
- Reducción de la porosidad.
- Mejorar la homogeneidad del recubrimiento.
- Reducir el contenido de óxidos.
- La precipitación de una fase dura.
- Modificaciones químicas.

Los métodos empleados para obtener dichas mejoras incluyen:

- Tratamientos químicos y físicos tales como el sellado orgánico, la aluminización y el cromado.
- Tratamientos térmicos tales como la fusión, tratamiento con calor, difusión, recristalización, amorfización con láser, compresión isostática en caliente (en inglés HIP: “Hot Isostatic Pressing”).
- Tratamientos mecánicos, incluyendo el maquinado, esmerilado, deformación superficial en frío mediante balines, HIP y pulido.

### *5.1 TRATAMIENTOS DE ACABADO.*

Los recubrimientos por proyección térmica exhiben dos aspectos comunes: un acabado superficial con aspecto de lija, y una estructura con porosidad inherente. La rugosidad típica de un recubrimiento rociado se encuentra en el rango de 5 a 13 $\mu$ m en promedio. La porosidad usualmente varía en el rango de 2 a 17% en volumen dependiendo del proceso por el cual el recubrimiento es depositado. La operación post-rociado más común es el esmerilado con rueda abrasiva. La selección de los elementos abrasivos depende de la dureza del recubrimiento, el acabado final y la precisión dimensional requerida.

### 5.1.1 MAQUINADO

Las herramientas de aceros de alta velocidad (HSS) pueden ser usadas para maquinar los materiales más suaves rociados por proyección térmica, como se muestra en la figura 5.1, como los aceros al bajo carbono, aleaciones base cobre y aluminio. Los materiales más duros requieren comúnmente el uso de herramientas de carburo.



Figura 5.1 Maquinado de pieza metálica.<sup>72</sup>

No existen reglas estandarizadas para determinar las velocidades, la profundidad de corte por pasada y ángulos apropiados para el maquinado de los recubrimientos. Una práctica generalmente aceptada es reducir significativamente en la profundidad de corte por pasada. Usualmente, dicha profundidad se limita a 0.5 mm por pasada. Esta práctica tiende a limitar el esfuerzo generado en la intercara recubrimiento-sustrato.

Los recubrimientos metálicos se tornean fácilmente para remover la rugosidad generada por la deposición del recubrimiento. Debido a que las estructuras de los materiales rociados son granulares en vez de homogéneas, las virutas son similares a las resultantes durante el torneado de hierro fundido. La superficie resultante del maquinado tendrá un aspecto opaco, con fina porosidad aparente. Las velocidades de torneado, el avance, y la forma de las herramientas también pueden ser extraída de los estándares y normas metalúrgicas para materiales en particular. Los fluidos de corte, lubricantes, refrigerantes, o maquinado en seco pueden ser utilizados. Sin embargo, dichos fluidos pueden penetrar y permanecer en el recubrimiento después del maquinado. Las herramientas de carburo se recomiendan debido a que en general los recubrimientos rociados son muy abrasivos y pueden desgastar rápidamente al herramental usado.

---

<sup>72</sup> Maquinado de pieza metálica. Fuente: [www.certaniumgroup.com/](http://www.certaniumgroup.com/)

### 5.1.2 *ESMERILADO.*

Para una mejor precisión dimensional y un mejor acabado, el esmerilado es preferido al maquinado. El esmerilado puede ser lubricado o en seco, aunque se prefiere el primero para los recubrimientos por proyección térmica debido a la gran libertad en la selección de abrasivos y discos, ver figura 5.2.



Figura 5.2 Esmerilado.<sup>73</sup>

Aunque el esmerilado es un proceso ampliamente extendido en la industria, el esmerilado de recubrimientos rociados térmicamente involucra las siguientes consideraciones:

- Los recubrimientos rociados tienden a “sobrecargar” rápidamente a los discos abrasivos; para controlar el desgaste de los discos, se usan granos relativamente gruesos con poco contenido en aglutinante.
- Uso de cortes ligeros debido a que la presión excesiva puede ocasionar agrietamiento, remoción, delaminación o fractura en el recubrimiento.
- No obtener “chispeo” en la pasada final pues esto puede amorfizar el recubrimiento.
- Mantener los discos lo más frío posible.
- Pueden ser usados discos de alúmina, carburo de silicio y diamante.

---

<sup>73</sup> Esmerilado. Fuente: [www.jmcprl.net/](http://www.jmcprl.net/)

### 5.1.3 PULIDO.

Los recubrimientos previamente torneados o esmerilados pueden ser posteriormente pulidos para alcanzar altos acabados tipo espejo, como muestra la figura 5.3, por debajo de 1 a 2  $\mu\text{m}$ .



Figura 5.3 Piezas metálicas pulidas.<sup>74</sup>

Dichos acabados son generalmente posibles sólo en recubrimientos muy densos. El pulido puede efectuarse mediante lapeado y rectificado.

### 5.2 DENSIFICACIÓN.

La densificación de los recubrimientos rociados es una operación post-rociado comúnmente practicada. Su propósito es reducir la porosidad interconectada y obtener:

- Alta dureza y resistencia al desgaste.
- Mejorar la cohesión entre partículas.
- Generar una barrera contra los productos corrosivos.

### 5.3 FUSIÓN

Algunos recubrimientos completamente densos y totalmente homogéneos se producen mediante la fusión de éstos a 1010°C. Tanto el recubrimiento como el sustrato se tratan mediante antorcha o calentamiento en horno. Los recubrimientos de la familia de las aleaciones autofundentes se aplican mediante proyección térmica por flama partiendo de su presentación en polvos. Las aleaciones autofundentes contienen elementos que reaccionan con el oxígeno o con óxidos de para formar óxidos de baja densidad que “flotan” hacia la superficie del recubrimiento, mejorando con esto la densidad, la adhesión y otras características deseables. En general, estas aleaciones base níquel o cobalto contiene boro y/o silicio, solos o en combinación en un 1.5% en exceso, tanto como carbono y hierro. El cromo es añadido a muchas aleaciones para que éstas resistan la corrosión y el desgaste.

<sup>74</sup> Piezas metálicas pulidas. Fuente: [http://www.spec-net.com.au/press/0908/mmp\\_170908.htm](http://www.spec-net.com.au/press/0908/mmp_170908.htm)

La tabla 5.1 muestra las composiciones de algunas aleaciones autofundentes que se rocían y después se funden.

Designación de La aleación	Composición. % en peso							
	Ni	Co	Cr	C	Si	B	Fe	W
Deloro Aleación 40	bal.	.....	7.5	0.35	3.5	1.7	1.5	.....
Deloro Aleación 50	bal.	.....	11.0	0.45	4.0	2.4	3.0	.....
Deloro Aleación 60	bal.	.....	15.5	0.8	4.3	3.5	4.0	.....
Stellite SF6	13	bal.	19	0.7	2.3	1.7	3.0	7.5
Stellite SF6 Aleación 157	2 máx.	bal.	22	0.1	1.6	2.4	2 máx.	4.5

bal.: Balanceado; máx.: máximo.

Tabla 5.1 Composiciones de algunas aleaciones autofundentes que se rocían y después se funden.<sup>75</sup>

El boro y el silicio desempeñan varias funciones. El boro es un potente endurecedor tanto para las aleaciones base níquel como las base cobalto, y combinado con el silicio logra disminuir el punto de fusión de la mezcla en varios cientos de grados centígrados, debido a la formación de aleaciones de composición eutéctica. El boro y el silicio también promueven el esparcimiento de las partículas mediante la reducción de los óxidos de níquel, cobalto, cromo y hierro, además controlan la tensión superficial y la fluidez. Durante la fusión, se forma un vidrio de borosilicato el cual tiene más adelante la intención de reducir la oxidación. El boro y el silicio son agentes autofundentes, de ahí el término “autofundente” dado a la aleación.

Adicionalmente, se puede incrementar la resistencia a la corrosión del recubrimiento obtenido mediante lo siguiente:

- Incrementando el contenido de Cr a más del 26%.
- Añadiendo Cr, Mo y Cu (en menos del 5% de cada uno).
- Sustituyendo el Ni con una mezcla de Co y Mo (Dicha mezcla debe ser menor al 8%).

Los recubrimientos posteriormente fundidos exhiben estas propiedades:

- Cerca del 100% densos, impermeables y unidos metalúrgicamente al sustrato.
- Alta dureza, en el rango de 20 a 70 HRC.
- Inclusiones de escoria en recubrimientos rociados por flama y posteriormente fundidos.

<sup>75</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 129.

- Buena resistencia al impacto, atribuida a la integridad excepcional del recubrimiento y a la unión metalúrgica.
- Buena resistencia a la corrosión y dureza a altas temperaturas, permitiendo temperaturas de servicio de la parte superiores a 650°C.
- Contracción del recubrimiento hasta del 20% durante la fusión mientras la porosidad se cierra.

El tratamiento con láser o el calentamiento por inducción pueden ser utilizados también para la fusión del recubrimiento.

#### 5.4 SELLADO.

Siendo los recubrimientos por proyección térmica porosos por naturaleza, se sellan frecuentemente con materiales orgánicos que penetran y llenan los poros. Los recubrimientos sellados y curados de esta manera tienen sus poros interconectados llenos, lo cual crea una barrera efectiva en contra de la penetración de materiales no deseados. Por ejemplo, los recubrimientos sellados:

- Previenen que los elementos de los ambientes corrosivos (sean líquidos o gaseosos) penetren al recubrimiento y ataquen a la intercara recubrimiento-sustrato.
- Evitan que los residuos derivados del proceso de esmerilado se fijen al recubrimiento (asumiendo que el recubrimiento se ha sellado previamente al esmerilado).
- Realzan la cohesión interpartículas.
- Extienden la vida de los recubrimientos de aluminio y zinc sobre acero para prevenir la corrosión.

La tabla 5.2 lista algunos selladores orgánicos comunes.

MATERIAL ORGÁNICO	CARACTERÍSTICAS
PINTURAS	Solubles en agua o solventes
CERAS	Fusión a baja temperatura
FENÓLICOS	Curado con aire caliente y seco
EPOXY-FENÓLICOS	Curado con aire caliente y seco
EPOXY RESINAS	Curado con empleo de catalizadores
POLIÉSTERES	Curado al aire o con calor y empleando catalizador
SILICONES	Curado con calor
POLIURETANOS	Curado con aire seco o curado con catalizador
ACEITE DE LINAZA	Aire seco
POLIAMIDAS	Curado con calor
PINTURA DE ALQUITRÁN	Curado con aire seco
ANAERÓBICOS	Curado en ausencia de aire

Tabla 5.2 Lista de algunos selladores orgánicos comunes.<sup>76</sup>

La elección del sellador determina el tiempo y la temperatura de curado. Cuando se seleccione un sellador:

<sup>76</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 130.

1. Asegúrese que su viscosidad sea baja, con lo que se permite que el sellador penetre a una profundidad satisfactoria.
2. Determinar su resistencia a la corrosión química y temperatura de servicio después del curado.

Ambos factores nos marcan la pauta para determinar los usos y limitaciones de los selladores. Los selladores pueden ser aplicados con brocha, por rociado o por inmersión. El método usado depende de las propiedades del sellador y el tamaño del área tratada y recubierta.

#### *5.5 TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL.*

Este tratamiento posterior al rociado consiste en el impacto sobre el recubrimiento de pequeñas esferas metálicas o de vidrio con la finalidad de producir deformaciones plásticas las cuales a su vez generan esfuerzos residuales a compresión en la superficie del recubrimiento, lo cual mejora la resistencia a la fatiga del recubrimiento.

#### *5.6 COMPRESIÓN ISOSTÁTICA EN CALIENTE.*

La exposición de los recubrimientos a un ambiente de altas presiones hidrostáticas (del orden de los 10MPa o 1400 psi) y altas temperaturas-típicamente debajo de la temperatura de solidus: para aceros 1100°C aproximadamente, y 975°C para aleaciones base níquel, promueve su densificación y mejora las propiedades físicas de los recubrimientos rociados. El calor fomenta la difusión en la intercara recubrimiento-sustrato, mejorando con esto su resistencia de adhesión, mientras que la alta presión comprime al recubrimiento, colapsando y encogiéndolo los poros.

#### *5.7 TRATAMIENTO TÉRMICO.*

El tratamiento térmico tiene lugar a altas temperaturas pero también a temperaturas inferiores al punto de fusión del material del que está hecho el recubrimiento. En contraste con el proceso de fusión, no hay derretimiento del material. En contraste con la compresión isostática en caliente; el tratamiento térmico tiene lugar a presión atmosférica y en ocasiones al vacío.

Las razones para realizar un tratamiento térmico a un recubrimiento incluyen:

- Ocurre difusión entre el sustrato y los recubrimientos rociados, mejorando la resistencia de adhesión además crea una unión metalúrgica y una resistencia más alta del recubrimiento.

- Los esfuerzos residuales se relajan y la cohesión interpartículas se incrementa, de manera análoga al recocido, sólo que de manera más pronunciada. La dureza también puede ser reducida, y los recubrimientos muestran una ductilidad y resistencia al impacto, tanto como un incremento en la tenacidad a la fractura y en el módulo de elasticidad.
- La recrystalización y el crecimiento de grano ocurren mediante el sinterizado, la transformación de las formas laminares de las partículas y la creación de nuevas texturas microestructurales, lo cual en consecuencia mejora las propiedades mecánicas del recubrimiento.
- La recrystalización también puede servir para reducir la porosidad. Este es un fenómeno particularmente dependiente del tiempo y tal vez demasiado lento para ser considerado una práctica rentable.
- Ocurren cambios estructurales y de fase. El contenido de óxidos se reduce cuando el calentamiento se realiza bajo ambientes hidrogenados ( $H_2$ ) o al vacío. Similarmente, los carburos y los nitruros pueden ser modificados mediante un tratamiento selectivo. Los carburos típicamente se precipitan a partir de una solución sólida con cobalto para mejorar la tenacidad.

Los métodos para la realización del tratamiento térmico incluyen:

- Tratamiento térmico mediante horno al aire libre o bajo una atmósfera inerte o hidrogenada.
- Horno al vacío o bajo presión, empleando gases inertes.
- Calentamiento por inducción.
- Procesamiento láser (amorfización).

### 5.8 AMORFIZACIÓN CON LÁSER.

La amorfización con láser es el único método con el cual la energía térmica puede ser aplicada y controlada con precisión en términos de posición e intensidad. El rayo láser es una corriente de protones monocromáticos (de un solo color o longitud de onda) que puede ser dirigida y concentrada a distancias relativamente largas sin pérdida apreciable de potencia. Una de las grandes ventajas de los láseres en los tratamientos superficiales es que la intensidad energética puede ser controlada en zonas muy poco profundas, en otras palabras en fases líquidas delgadas, sobre el recubrimiento superficial. Este rasgo puede establecer las condiciones ideales para la realización de una extensa gama de tratamientos superficiales y recubrimientos, permitiendo la formación de una unión metalúrgica con una dilución mínima de la aleación del recubrimiento en el sustrato.

Este proceso está siendo hoy en día usado como reemplazo para algunos métodos convencionales de revestimiento duro (hardfacing) y con mayor importancia en la amorfización y aleación superficial. El tratamiento con láser lleva a la superficie del recubrimiento al estado líquido y después le permite solidificarse muy rápidamente. Dicha

alta tasa de solidificación provoca refinamientos microestructurales y otros cambios metalúrgicos que afectan profundamente las propiedades del metal.

## *5.9 INSPECCIÓN.*

Una vez que el recubrimiento ha sido rociado y sus post-tratamientos han sido consumados, entonces está listo para su inspección. Hay dos opciones disponibles: los ensayos destructivos y los ensayos no destructivos.

### *5.9.1 ENSAYOS DESTRUCTIVOS.*

En un ensayo destructivo se destruyen partes acabadas y una muestra del recubrimiento se remueve y prepara para el análisis metalográfico o escaneo con microscopio electrónico de barrido. Lo anterior proporciona la más precisa evaluación de la calidad de un recubrimiento posible, pero frecuentemente es algo muy impráctico cuando las partes son grandes, costosas o de número limitado.

Los ensayos destructivos más comunes son:

- Ensayo de desgarre (Adherencia).
- Ensayo de compresión.
- Ensayo de doblado.
- Pruebas de choque térmico.

### *5.9.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.*

Son aquellos que examinan de manera directa en la parte final recubierta sin dañar su apariencia o propiedades. Con estos métodos es posible examinar cada parte para alcanzar casi un 100% en el aseguramiento de la calidad. Los ensayos no destructivos no siempre proveen información cuantitativa tal como lo hacen los ensayos destructivos de adhesión.

Los ensayos no destructivos más comunes incluyen:

- Espesor.
- Textura superficial.
- Dureza.

### *5.10 CONTROL DEL EQUIPO DEL PROCESO.*

Los equipos de soporte para controlar los procesos de proyección térmica pueden ser catalogados de acuerdo con las siguientes funciones o subprocesos:

- Manipulación de la pistola y de la pieza.
- Control de alimentación de material.
- Control de la presión del gas.
- Control del flujo de gas.
- Control de energía.

#### *5.10.1 PARÁMETROS DEL PROCESO.*

Existen muchas variables en los procesos de proyección térmica. Los parámetros que afectan directamente las características del recubrimiento pueden ser simplificados en tiempo, temperatura, masa y manipulación.

#### *5.10.2 LAS VARIABLES DE MANIPULACIÓN.*

- Distancia de trabajo: es la distancia de la boquilla de la pistola a la pieza que va a ser recubierta.
- Velocidad de barrido: es la velocidad relativa entre la pistola y la pieza.
- Distancia de avance: es la distancia que se mueve la pistola, o en su caso la pieza, en cada pasada.
- Ángulo de impacto: es la variación del ángulo del chorro de proyección con respecto de la normal o  $90^\circ$  respecto a la superficie de la pieza.

#### *5.10.3 LA VARIABLE DEL TIEMPO.*

Es controlada, en parte, por:

- El diseño de la pistola (geometría y diámetro de salida).
- Flujo total de gas de flama/arco, esto es, el flujo de gas primario más el secundario.
- Características del arco de gas.
- Energía disponible, eléctrica o química, actuando sobre los gases.

#### *5.10.4 LA MASA.*

La masa es una variable compleja, quizá la más significativa de ellas además de ser la más difícil de controlar debido a que el suministro de material es usualmente mercancía comprada. La masa del material de proyección suministrado a la pistola tiene características muy importantes. Las variables más comunes relacionadas al suministro de material incluyen la química, punto de fusión, propiedades termo-físicas y coeficiente de expansión térmica.

Características importantes de la materia prima en alambre:

- Diámetro.
- Acabado superficial.
- Lubricación.
- Resistencia a la tensión.
- Esfuerzos residuales.

Características importantes de la materia prima en varilla:

- Diámetro.
- Rectitud.
- Porosidad.

Características importantes de la materia prima en polvo:

- Distribución del tamaño de partícula.
- Método de manufactura.
- Densidad aparente.
- Fluidez.

### 5.11 ALIMENTACIÓN DE MATERIAL.

Alimentadores de alambre o varilla. Se componen de motores eléctricos o neumáticos, rodillos y controles de velocidad. El punto de inyección del alambre o varilla y la tasa de alimentación son extremadamente importantes para controlar la calidad del recubrimiento. La uniformidad de alimentación depende de que el motor tenga suficiente par para vencer la fricción dentro del sistema, y en el caso de alambres, la producida por los carretes. El diseño de los rodillos es otro aspecto importante para una alimentación uniforme. Los rodillos deben agarrar el alambre o varilla lo suficiente para no permitir un deslizamiento y que tampoco deforme al alambre o fracture la varilla y comúnmente están hechos de fibras fenólicas para varillas y de metal para alambre. A continuación se muestra la figura 5.4, donde se observa la sujeción por canal en V y engranada.

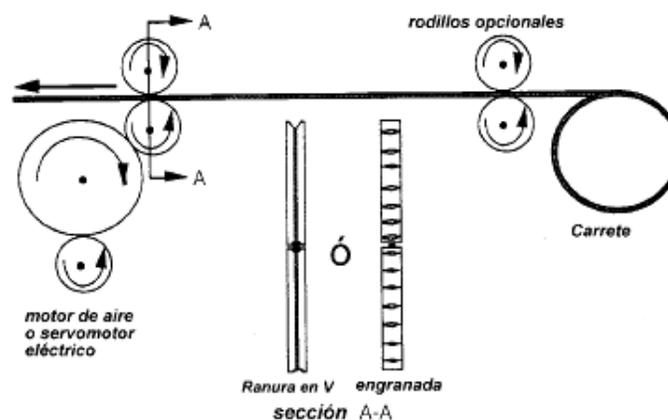


Figura 5.4 Dispositivos principales de alimentación de alambre.<sup>77</sup>

<sup>77</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 86.

La alimentación por varilla es usada donde los materiales para proyectar son muy difíciles de conformar o cuando son muy frágiles, como en el caso de los cerámicos, los cuales no pueden ser conformados en alambres. Las varillas típicas son no mayores a 500mm de longitud y en diámetro van de 4.75 a 7.94mm. Las desventajas de la alimentación por varillas son las interrupciones producidas por la no continuidad de las mismas.

La fricción en los conductos de los alambres entre el nacimiento del alambre y el mecanismo de alimentación o entre el mecanismo de alimentación y la pistola produce un deslizamiento de los rodillos. Se recomiendan unos conductos lo más cortos posibles y la posibilidad de usar alambres roscados.

Alimentación de polvos. Una característica común de todos los alimentadores de polvos es la salida, esto es, un chorro de gas transportador en el cual la alimentación del polvo es introducida y liberada al puerto de inyección de polvo de la pistola. Los alimentadores de polvo pueden agruparse en tres categorías básicas: Alimentadores por gravedad con agitación considerados como los más antiguos, alimentadores volumétricos y alimentadores de lecho fluidizado. Los alimentadores por gravedad con agitación no son muy precisos, son baratos y relativamente libres de problemas.

Los alimentadores de polvo volumétricos, ver figura 5.5, utilizan un mecanismo de desplazamiento positivo como tornillos, ruedas ranuradas o perforadas, en donde la velocidad de rotación controla el flujo de alimentación de la materia prima, para liberar paquetes de polvo en un carburador, donde es tomada por un chorro de gas transportador y liberado en el puerto de polvos de la pistola.

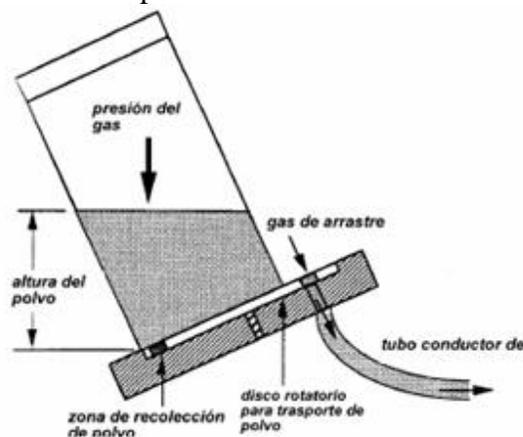


Figura 5.5 Alimentador volumétrico.<sup>78</sup>

Los alimentadores de cama o lecho fluidizado, son usados comúnmente en proyección térmica. En estas unidades, un “lecho” de polvo es agitado continuamente por un gas fluidizante, en este caso el gas de transporte. El propósito de este diseño es suspender un volumen de polvo controlado en un lecho usando un volumen de gas de tal manera que una muestra de polvo pueda ser llevada fuera a razón constante. El lecho debe estar en constante movimiento, esto significa fluidizado, ayudado por vibradores y por gravedad.

<sup>78</sup> Handbook of THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, pág. 87.

## CAPÍTULO 6. EXPERIMENTACIÓN

Para llevar a cabo la obtención de recubrimientos y la caracterización del proceso es necesario seguir una serie controlada de pasos tal como se muestra en el diagrama 1, que se describe a detalle en este capítulo.

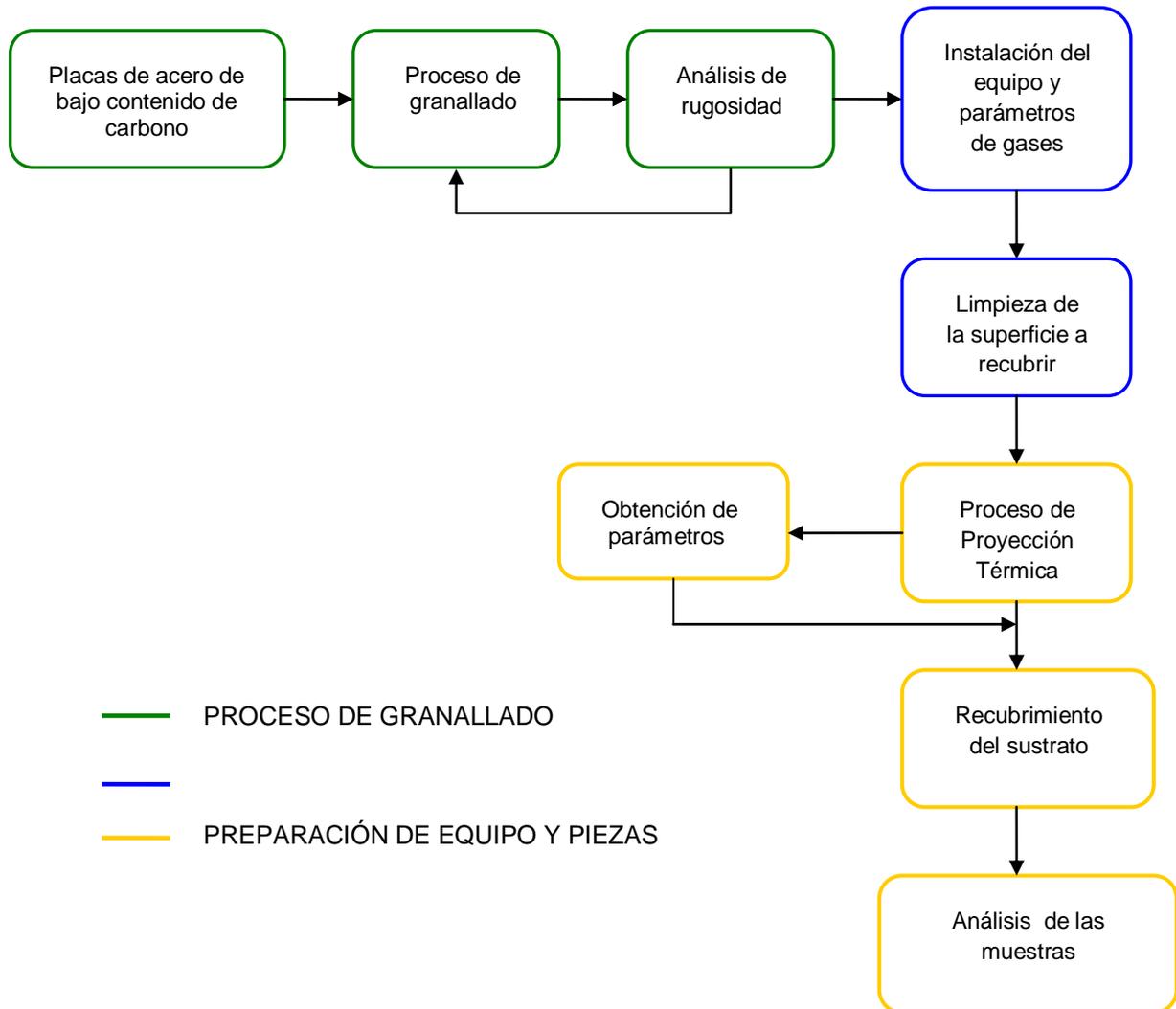


Diagrama 1. Procedimiento utilizado en forma simplificada.

### 1) *OBTENCIÓN DE SUSTRATOS PARA GRANALLAR.*

Partiendo de una barra de acero de bajo contenido de carbono de 2 [in] (5.08 [cm]) de ancho y  $\frac{1}{4}$  [in] (6.35 [mm]) de espesor, el primer paso es cortar sustratos a una longitud de 10 [cm], teniendo ya los sustratos se realiza un desbaste a cada una de sus aristas (chaflán) para eliminar los filos y evitar un desprendimiento del recubrimiento en esas zonas como se muestra en la figura 6.1, posteriormente se eliminan las impurezas de la superficie como son: óxidos, grasas, partículas como rebabas o polvos etc.



Fig. 6.1 Sustrato de acero cortado, con chaflán.<sup>79</sup>

### 2) *OBTENCIÓN DE RUGOSIDAD.*

El siguiente paso es obtener un valor de rugosidad óptima, el cual es descrito a continuación:

Parámetros:

Presión de aire del compresor.

Distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato.

Tiempo de granallado.

Procedimiento para determinar la rugosidad óptima de la superficie de los sustratos:

Tipo de granalla utilizado: Granalla angular de óxido de aluminio café F-12 CH

Tomando como valores constantes para el granallado de los sustratos los valores de: Presión de aire del compresor de 7 [Bar], distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato de 1 [in].

- 1) Granallar sustratos, ver figura 6.2, en los cuales, la variable a manejar es el tiempo, tomar intervalos de 0.5 [min], de 0 a 5 [min], y posteriormente ampliar el intervalo a 2 y 3 [min].

---

<sup>79</sup> Laboratorio de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.



Fig. 6.2 Proceso de granallado.<sup>80</sup>

- 2) Analizar por medio de un rugosímetro digital (Mitutoyo SurfTest-402), figura 6.3, el valor de rugosidad obtenido con cada variación de tiempo.



Fig. 6.3 Rugosímetro digital.<sup>81</sup>

- 3) Se grafican y analizan los resultados obtenidos.
- 4) Obtener los parámetros óptimos para el granallado.

### 3) *OBTENCIÓN DE SUSTRATOS PARA PROYECCIÓN TÉRMICA.*

Teniendo controlados los parámetros variables del proceso de preparación superficial se procede a granallar todas las piezas con estas mismas condiciones tal como la mostrada en la figura 6.4.



Fig. 6.4 Sustrato granallado.<sup>82</sup>

<sup>80</sup> Laboratorio de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

<sup>81</sup> Laboratorio de mediciones mecánicas, Facultad de Ingeniería, UNAM.

<sup>82</sup> Laboratorio de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

#### 4) LIMPIEZA.

Previo al proceso de proyección térmica se limpia cada placa con unas gotas de alcohol industrial (Alcohol Metílico Anhidro: Mallinckrodt Baker, S. A. de C. V., 55320, Xalostoc, Edo. de México) figura 6.5, y una pequeña brocha, para evitar que tenga impurezas como grasa, polvo u otras partículas.

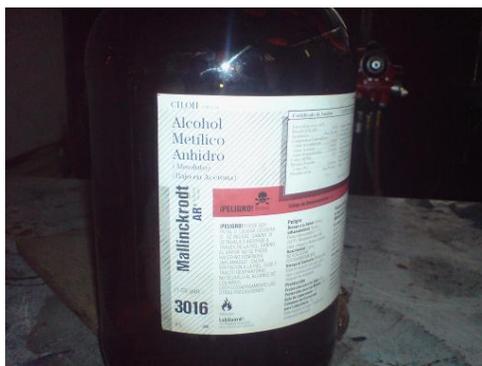


Fig. 6.5 Alcohol Metílico Anhidro.<sup>83</sup>

#### 5) PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA.

Tipo de alambre de alimentación utilizado: Alambre de acero inoxidable (Martensítico) Fe 13Cr 0.5Si 0.5Ni 1Mn 0.35C, ver apéndice A2, diagrama 1.

##### ➤ Armado del equipo.

El primer paso es el correcto armado o instalación del equipo, ver capítulo 2, figura 2.1

Los parámetros a considerar antes de iniciar el proceso de proyección térmica son:

##### ➤ Presión de aire.

La presión de aire a la salida del compresor debe ser igual o mayor a 5 [Bar], este parámetro es proporcionado por el proveedor del equipo, además de que el flujo de aire debe ser abundante, por lo que se deben evitar reducciones en la conexión pistola-compresor.

##### ➤ Lectura del flujómetro de gases.

Para comenzar el proceso se debe considerar la lectura de los manómetros en los cilindros (presiones de trabajo) y en el flujómetro de los gases, oxígeno y acetileno, los cuales se manejan en base al material utilizado y los valores descritos en el apéndice 2, proporcionado por el proveedor.

##### ➤ Distancia entre la boquilla y la superficie del sustrato.

Para la obtención de una distancia óptima en el proceso se realiza la prueba llamada

---

<sup>83</sup> Laboratorio de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

“Patrón de huella”, la cual consiste básicamente en los siguientes pasos:

- 1) Con los parámetros obtenidos anteriormente para el proceso de granallado y de lectura de gases, el primer paso es realizar el proceso de proyección térmica sobre un punto fijo de cada sustrato, ver figura 6.6, con un tiempo común definido de 1 [min], haciendo únicamente variaciones de la distancia entre la boquilla de la pistola y la superficie de cada sustrato, esto es, dirigiendo el flujo de material proyectado a un solo punto de cada sustrato sin realizar ningún movimiento durante este proceso y variando la distancia de la boquilla de la pistola y la superficie en los siguientes sustratos para obtener un patrón de huellas de proyección a diferentes distancias.

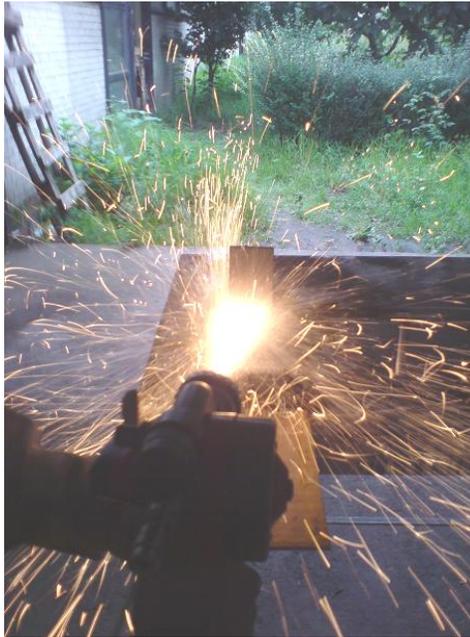


Fig. 6.6 Proceso de proyección térmica en un solo punto.<sup>84</sup>

- 2) Una vez obtenido este patrón de huellas de proyección a diferentes distancias se procede a extraer una pequeña parte de la huella de cada probeta por medio de una cortadora abrasiva marca BUEHLER Abrasimet 2, y un disco para corte metalográfico marca BUEHLER 10-4212, Hard steel y se prepara realizando el proceso de metalografía.
- 3) Estas partes son analizadas por medio de microscopía electrónica para determinar las características obtenidas en cada evento por medio de un microscopio electrónico de barrido marca Philips serie XL20
- 4) Finalmente se procede al análisis de los resultados obtenidos para determinar el parámetro de distancia entre la boquilla de la pistola y la superficie del sustrato.

<sup>84</sup> Laboratorio de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

➤ Tiempo.

Tales parámetros son la base para dar inicio al proceso de proyección térmica por alambre en todos los sustratos, teniendo como única variable el tiempo.

➤ Pre calentamiento.

El pre calentamiento de los sustratos se realiza con la misma flama de la pistola de proyección térmica (con la válvula de flujo de alambre cerrada) a una temperatura de 90 [°C] para evitar el fácil desprendimiento del recubrimiento por sobrecalentamiento, por lo que en todo el proceso se deben obtener las temperaturas de las probetas por medio de un termómetro digital marca EXTECH Instruments 42510. Para el proceso de proyección térmica se realiza el recubrimiento: estando los sustratos en posición vertical, avanzando en forma de zigzag de arriba hacia abajo y viceversa, ver figura 6.7.

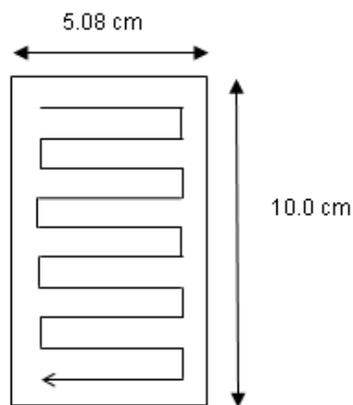


Fig. 6.7 Trayectoria utilizada en el proceso de granallado y de proyección térmica.

Las placas se sujetan por medio de una pequeña prensa de banco de manipulación sencilla y fácil acomodo en diferentes posiciones y formando un ángulo de 90° entre la superficie del sustrato y la boquilla de la pistola, ver figura 6.8.



Fig. 6.8 Proceso de proyección térmica con alimentación de alambre.<sup>85</sup>

<sup>85</sup> Laboratorio de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

La temperatura de cada una de las probetas, al momento de ser recubiertas, es controlada por medio de intervalos (constantes de 1 [min]) de proyección para evitar su sobrecalentamiento, y por medio de su permanencia al aire libre se disminuye su temperatura con lo que se tiene el control del intervalo de temperatura recomendado por el proveedor (de 90 a 120 [°C]).

La parte final de la experimentación consiste en realizar observaciones en un microscopio electrónico y en evaluar microdureza Vickers en un área de sección transversal perpendicular a la cara recubierta, tomando una pequeña muestra de cada una de las probetas, realizando el corte por medio de una máquina cortadora abrasiva marca BUEHLER Abrasimet 2, figura 6.9, y un disco para corte metalográfico marca BUEHLER 10-4212, Hard steel, y preparándolos mediante el proceso de metalografía.



Fig. 6.9 Cortadora abrasiva marca Buehler.<sup>86</sup>

---

<sup>86</sup> Laboratorio de Metalografía, Facultad de Ingeniería, UNAM.

## CAPITULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

De acuerdo a la experimentación realizada, a continuación se presenta de forma detallada cada uno de los análisis de las pruebas efectuadas y la discusión de los resultados obtenidos.

### 1) PROCESO DE GRANALLADO

➤ Parámetro de distancia en el proceso de granallado.

La tabla 7.1 muestra los datos obtenidos en las pruebas de variación de tiempo de granallado contra rugosidad Ra (Rugosidad promedio del área analizada, ver figura 7.1), con los cuales se obtuvo su curva característica, figura 7.2, para determinar el parámetro de tiempo de granallado que es función de la rugosidad obtenida.

Número de probeta	Tiempo [min]	Rugosidad [ $\mu\text{m}$ ]
1	0.5	6.6
2	1	8
3	1.5	8
4	2	8.5
5	2.5	10.2
6	3	8.6
7	3.5	8.8
8	4	9
9	4.5	8.9
10	5	7.8
11	8	8
12	10	8.2

Tabla 7.1 Valores característicos de tiempo de granallado contra rugosidad.

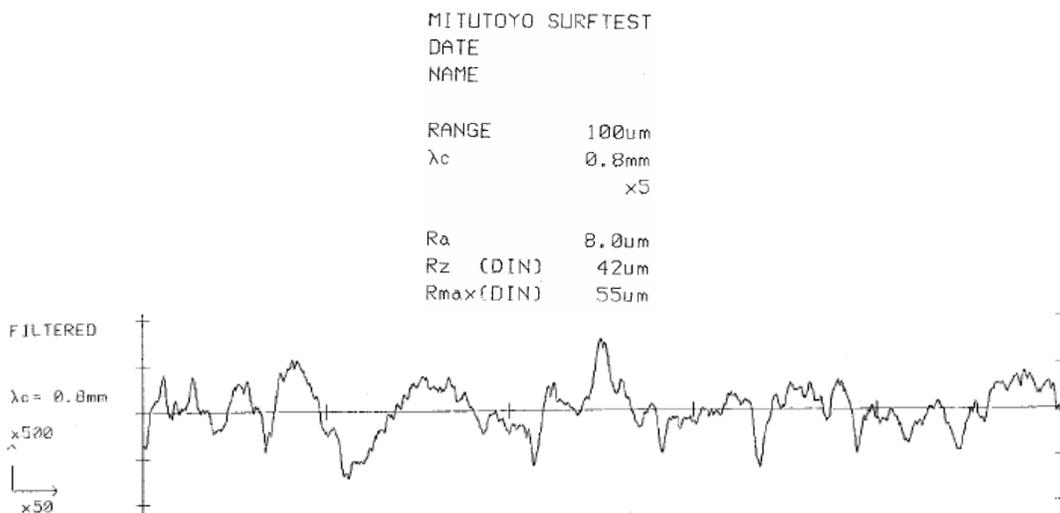


Fig. 7.1 Grafica obtenida en el análisis de rugosidad promedio Ra (8 [ $\mu\text{m}$ ]) de una placa con 1 [min] de granallado



Fig. 7.2 Curva característica de granallado, rugosidad contra tiempo.

Por medio de la geometría de la superficie a trabajar y del tiempo invertido en el proceso, la velocidad de la pistola de granallado respecto a la superficie del sustrato es 50.8 [cm/min] Para el rango de valores utilizado, se puede notar que la rugosidad mínima obtenida es de 6.6 [ $\mu\text{m}$ ], la máxima de 10.2 [ $\mu\text{m}$ ] y el promedio de 8.38 [ $\mu\text{m}$ ].

Para estas condiciones los sustratos de acero presentaron una adecuada rugosidad para un tiempo de 2 minutos; para tiempos mayores a éste, el comportamiento no tiene un cambio significativo de rugosidad superficial, lo que evidencia que el tiempo adecuado para el granallado es de 2 [min]

Con estas condiciones se obtuvieron los parámetros para el proceso de granallado:

- Presión de aire a la salida del compresor: 7 [Bar]
- Distancia entre: boquilla de la pistola granalladora y superficie del sustrato: 1 [in]
- Tiempo de granallado: 2 [min]

## 2) PROCESO DE PROYECCIÓN TERMICA.

- Distancia entre la boquilla y la superficie del sustrato, patrón de huella.

Se realizó un análisis detallado de la distancia de proyección que, como se ha comentado anteriormente es fundamental para encontrar el patrón de rociado, para ello se realizaron varias pruebas de rociado encontrando las mejores características en las probetas proyectadas a 9, 10 y 11 [in]. Se tomó como parámetro óptimo la distancia de 10 [in], principalmente debido a que éstas presentaron, en el área de unión del recubrimiento y sustrato: una aceptable adherencia entre el sustrato y el recubrimiento debido a una considerable disminución de porosidades y de inclusiones de óxido, una muy buena homogeneidad en cuanto a las capas, tanto internas como en la superficie del recubrimiento y de partículas fundidas de material de alimentación, ver figura 7.

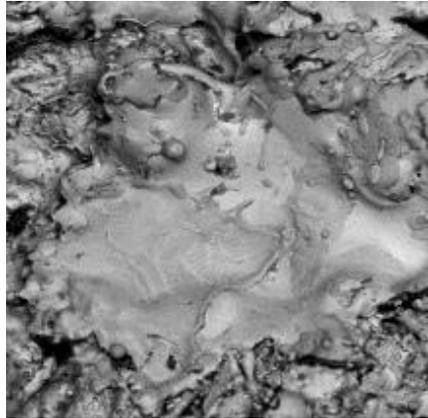


Fig. 7.3 Splat formado en una superficie aceptable. BSE, 200x.

Posteriormente a los recubrimientos obtenidos con estas distancias se les realizó un análisis químico que evidencia la presencia de hierro y cromo como sus principales componentes.

El análisis químico realizado (espectroscopía por energía dispersada, EDS), con ayuda de un transistor de efecto de campo, FET, provee la amplificación de las señales resultantes para su digitalización y almacenamiento en la memoria de la computadora del microscopio electrónico de barrido, las figuras 7.4 a) y b) muestran los componentes del alambre utilizado después de ser proyectado en una zona del sustrato.

kV:20.00      Tilt:15.00      Take-off:52.94      Tc:40  
 Detector Type :SUTW-Sapphire      Lsec :108      Resolution :145.55  
 EDAX ZAF Quantification      Standardless  
 Element Normalized  
 SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F	
AlK		1.88	3.72	0.0085	1.0821	0.4171	1.001
SiK		0.97	1.85	0.0058	1.1131	0.5352	1.0016
CrK		18.32	18.86	0.2156	0.9949	0.993	1.1912
FeK		78.83	75.56	0.7689	0.997	0.9783	1
Total		100	100				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
CrL	13.86	2.65	2.81	5.24
FeL	21.48	4.07	2.26	5.28
AlK	9.26	9.39	4.47	0.99
SiK	5.85	10.83	6.7	0.54
CrK	80.37	11.36	1.14	7.07
FeK	212.17	6.92	0.67	30.66

Fig. 7.4 a) Resultado numérico del análisis químico sobre una zona del recubrimiento.

Label A:

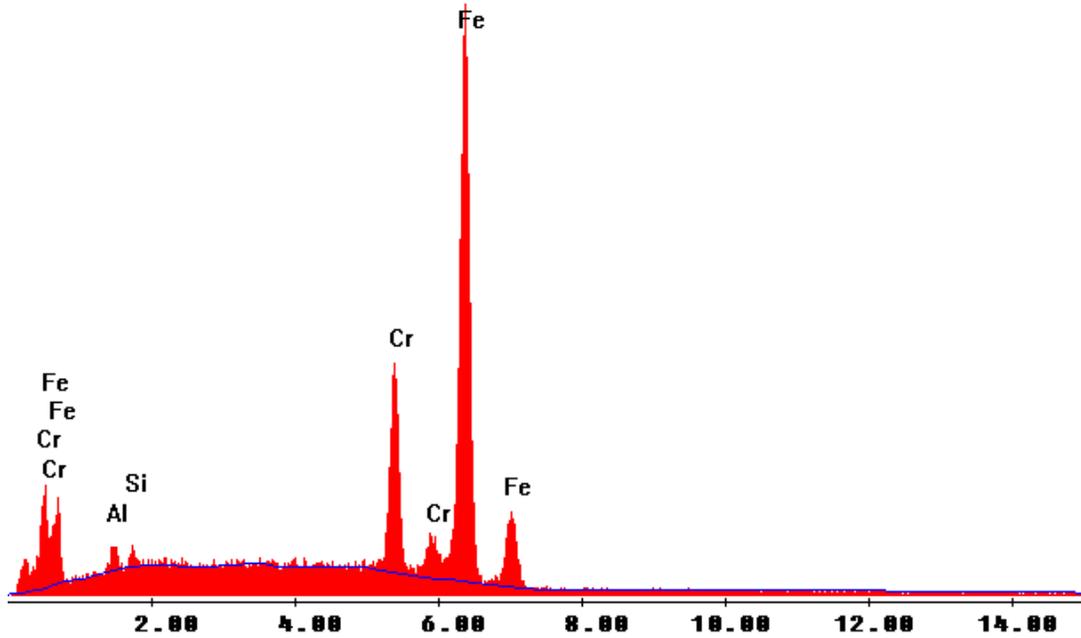


Fig. 7.4 b) Resultado gráfico del análisis químico sobre una zona del recubrimiento.

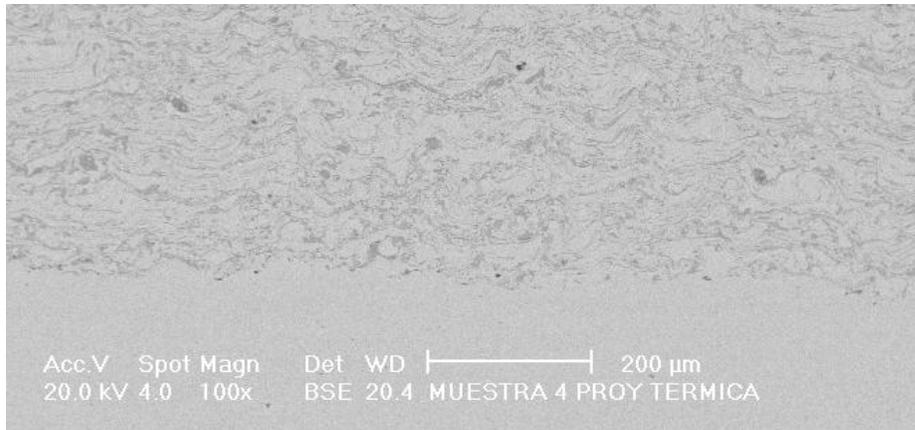
De los resultados del análisis químico, es importante señalar que no aparecen los elementos níquel y manganeso que se encuentran en el material de alimentación, no son detectados debido a: el bajo porcentaje de contenido de estos dos elementos (0.5% ambos), a que es considerado un análisis puntual, es decir, que en el punto donde se realizó la espectroscopía no hubo presencia de níquel y manganeso, y a características de este equipo, como que es un análisis cualitativo y a su baja resolución.

Las figuras 7.5 a), b) y c), muestran imágenes representativas del proceso.

a)

Recubrimiento

Sustrato



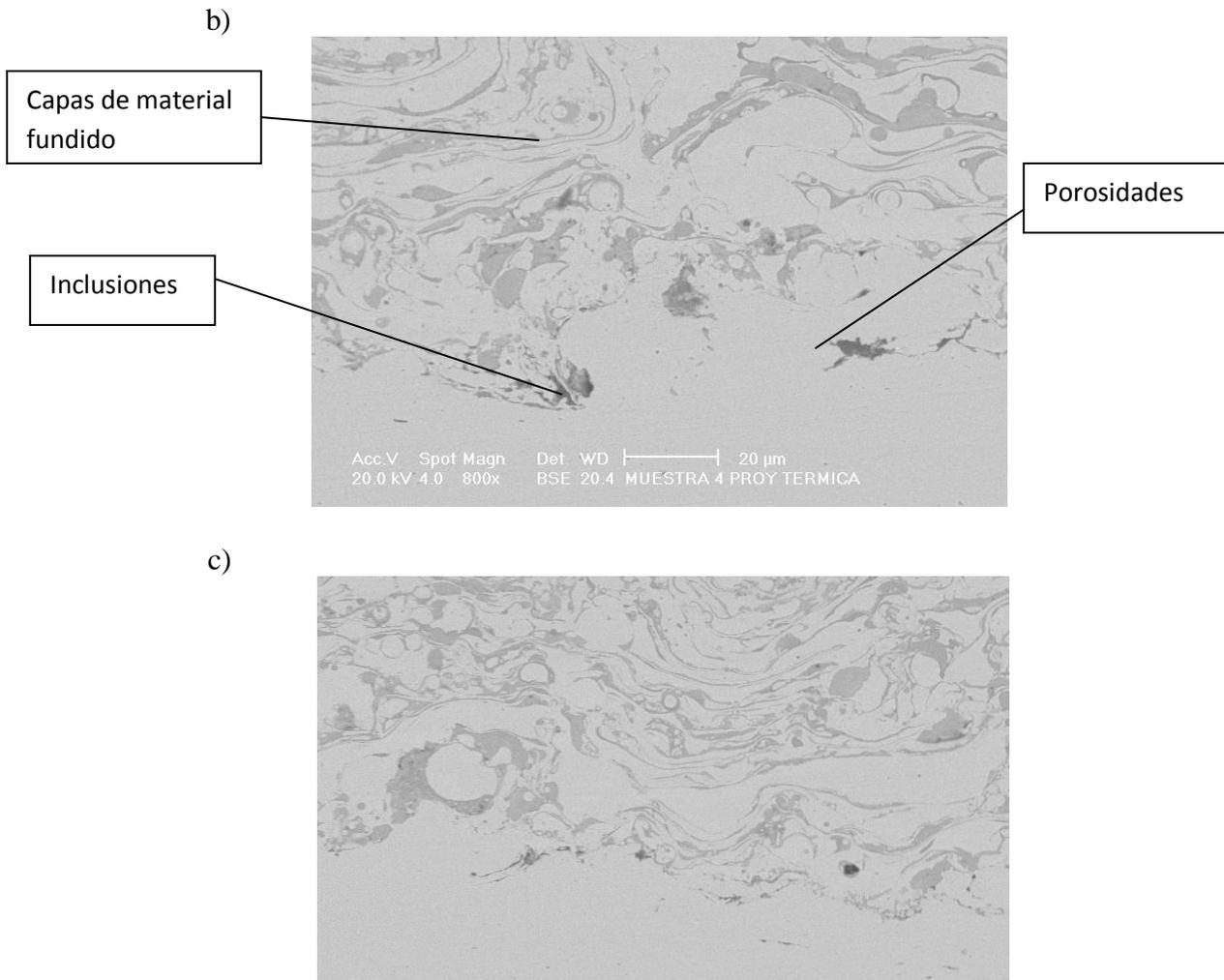


Fig. 7.5 a) Imagen representativa del proceso a una distancia de 10 [in], BSE, 100x b) Características típicas del proceso, BSE, 800x c) Zona con disminución de porosidades e inclusiones, característica obtenida con los parámetros trabajados, BSE, 500x.

Las probetas proyectadas en un intervalo diferente a 9-11 [in], no son lo suficientemente aceptables como parámetro de distancia, debido a que presentan:

- A una distancia menor a 9 [in]: Un sobrecalentamiento, esto se refleja en un cambio de coloración, tanto en el sustrato, como en la superficie del recubrimiento, tomando un color oscuro típico del sobrecalentamiento de una placa de acero, derivado de esto presentan también un mal acabado superficial y una deficiente adherencia entre recubrimiento y sustrato.
- A una distancia mayor a 11 [in]: Una deficiente adherencia entre recubrimiento y sustrato debido a que, a mayor distancia, las partículas fundidas de material no logran conservar completamente su estado líquido, provocando una gran cantidad de porosidades, tanto en las capas internas como en la superficie, provocando además, un mal acabado superficial, ver figura 7.6.

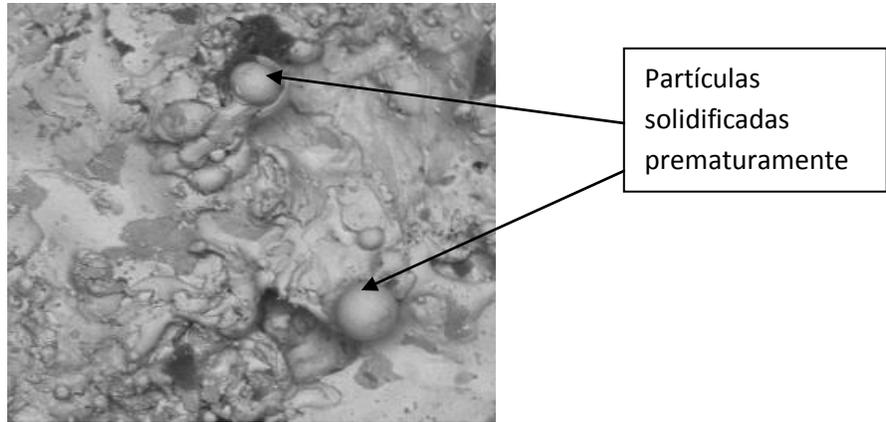


Fig. 7.6 Partículas formadas en una superficie con mal acabado. BSE, 200x.

➤ Proceso de proyección térmica a diferentes tiempos.

A continuación se muestran en la tabla 7.7 los datos de los espesores obtenidos mediante la variación del tiempo de proyección en cada probeta.

Número de probeta	Tiempo de proyección [min.]	Espesor [ $\mu\text{m}$ ]
1	0.15	68.97
2	0.30	93.45
3	0.50	145.33
4	1.00	281.69
5	1.50	383.0
6	2.00	781.69
7	2.50	908.45
8	3.00	1049.3
9	4.00	1126.76
10	5.00	1408.45
11	7.00	2436.62
12	10.0	3267.61
13	13.0	3457.75
14	17.0	8528.17
15	30.0	15531.91

Tabla 7.7 Valores característicos del proceso de proyección térmica por alambre.

Como podemos observar en la figura 7.8, la curva característica del proceso de proyección térmica presenta dos comportamientos notorios diferentes.

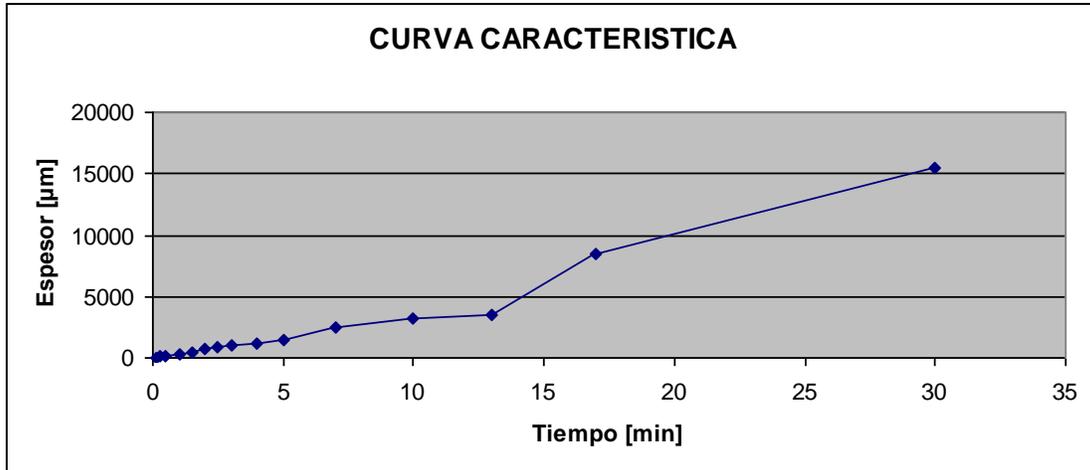


Fig. 7.8 Curva característica del proceso de proyección térmica por alambre, espesor contra tiempo.

De estos dos comportamientos, el primero es prácticamente lineal dentro del intervalo de 0.15 [min] (1 capa de recubrimiento) hasta 13 [min], incrementando el espesor del recubrimiento de manera proporcional al tiempo de proyección como se muestra en la figura 7.9.

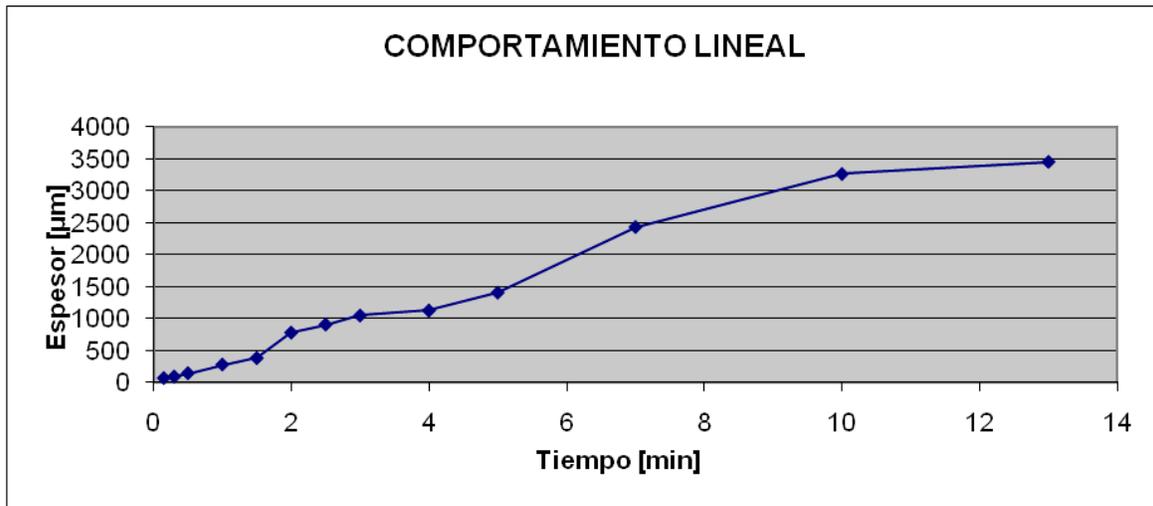


Fig. 7.9 Intervalo de la curva característica de proyección térmica por alambre con comportamiento lineal.

Esta parte de la curva con tendencia lineal es aproximada al siguiente modelo matemático en función del tiempo de protección:

$$y[\mu\text{m}] = 288.063 x[\text{min}] + 1.3[\mu\text{m}]$$

Dónde:

$y[\mu\text{m}]$  = Espesor del recubrimiento

$x[\text{min}]$  = Tiempo de proyección.

O en función del espesor del recubrimiento:

$$x[\text{min}] = (y[\mu\text{m}] - 1.3[\mu\text{m}]) / 288.063$$

La figura 7.10 muestra gráficamente la curva característica del proceso y la aproximación lineal de dicho modelo matemático.

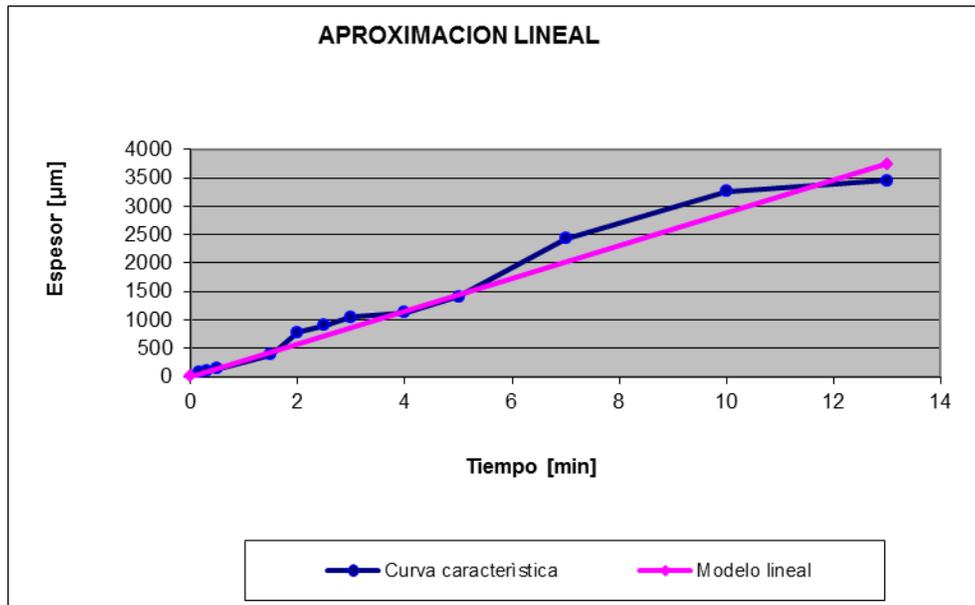


Fig. 7.10 Representación gráfica de la curva característica del proceso y del modelo lineal.

Físicamente, en dicho intervalo, la forma de la superficie de las probetas resultó prácticamente homogénea, sin cambios significativos en cuanto al plano formado por la superficie del recubrimiento y el plano formado en un inicio por la superficie previamente preparada del sustrato, ver figura 7.11.

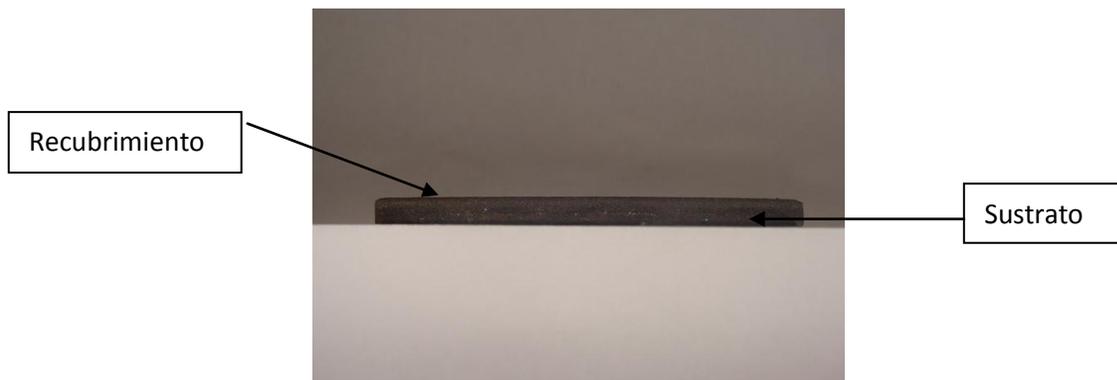


Fig. 7.11 Vista lateral de la probeta con recubrimiento a 4 [min].

El segundo comportamiento, a partir de los 13 [min], pierde su homogeneidad, regularidad y linealidad y hay presencia de deformaciones en la superficie de las probetas, ver figura 7.12.

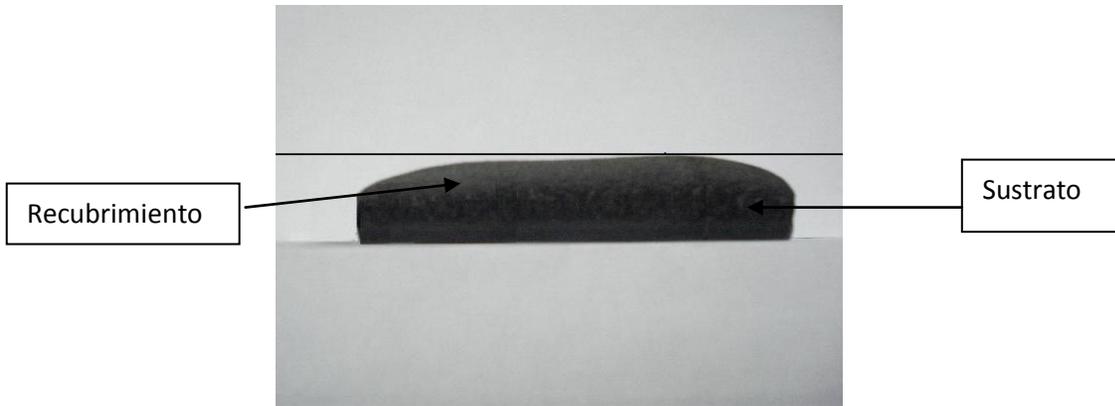


Fig. 7.12 Vista lateral de la probeta con recubrimiento a 30 [min].

De acuerdo a los resultados obtenidos y al análisis de las probetas realizadas se puede concluir lo siguiente:

El cambio físico presentado en las probetas con un tiempo de proyección mayor a 13 [min] (aproximadamente 3.5 [mm] de recubrimiento) se debe a que, a partir de este tiempo de proyección, el recubrimiento presenta un aumento de densidad, este aumento es provocado por la saturación de material de alimentación por cada capa y por la disminución de concentración de cromo, el cual debido a la misma saturación, tiende a migrar en zonas libres como son espacios intrasplats o porosidades, favoreciendo la saturación y el aumento de densidad. En comparación con la morfología interna de los recubrimientos con un tiempo menor a 13 [min] se observa un arreglo diferente en cuanto a la forma en que se posicionan los splats, presentan una forma con menor grado de compactación el cual se puede observar en la morfología interna del recubrimiento, ver figura 7.13, 7.14 y 7.15, lo anterior provoca la pérdida gradual de la homogeneidad superficial inicial, dando como resultado esta irregularidad en la superficie.

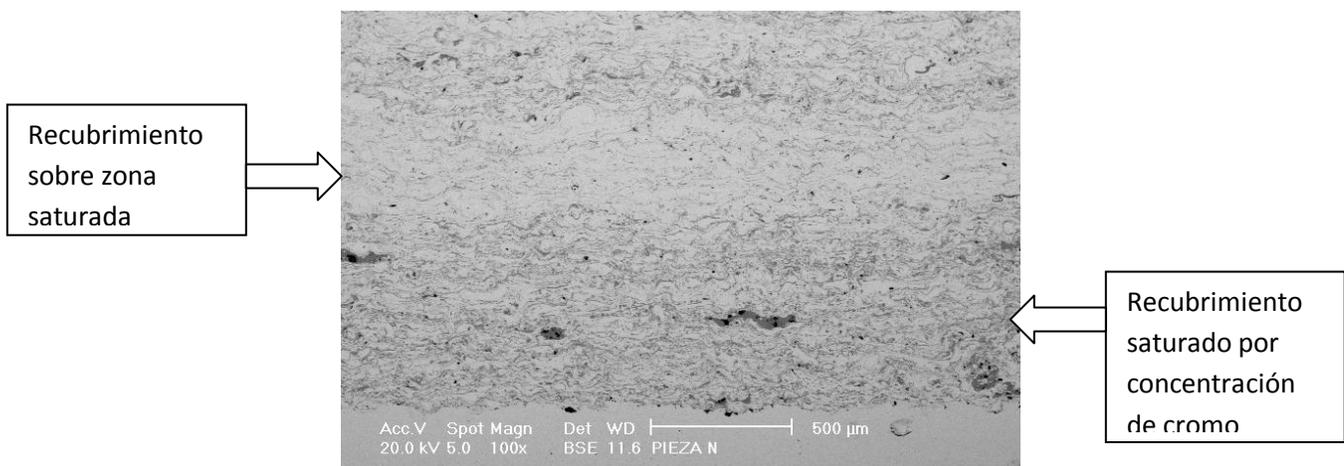


Fig. 7.13 Recubrimiento en el cual se muestra una zona saturada con una gran cantidad de splats deformados e irregulares, y una zona no saturada con splats regulares. BSE, 100x.

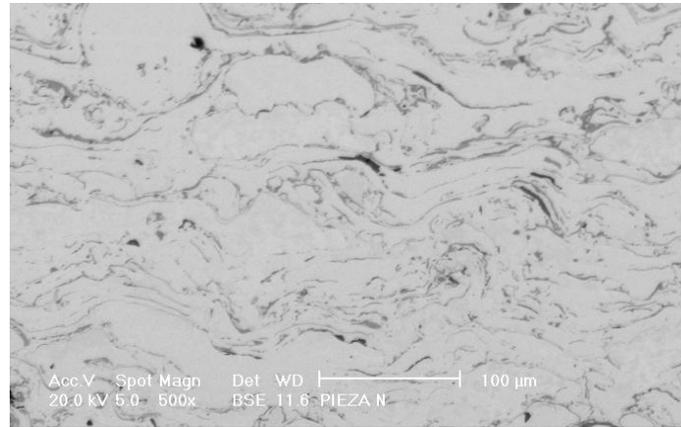


Fig. 7.14 Recubrimiento no saturado de cromo, con splats regulares. BSE, 500x.

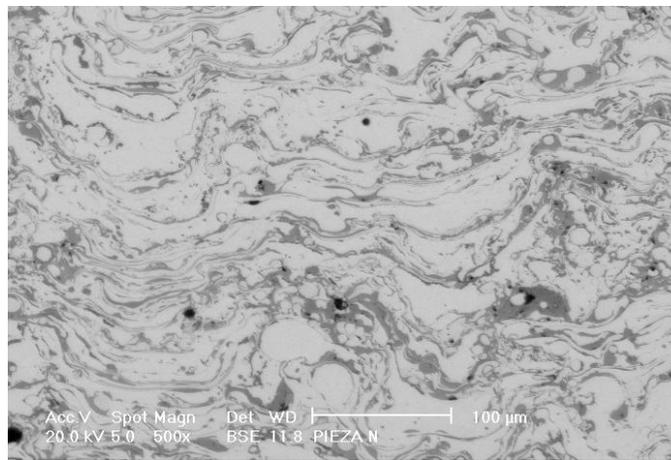


Fig. 7.15 Recubrimiento saturado por concentración de cromo. BSE, 500x.

Es posible continuar el proceso y seguir incrementando el espesor del recubrimiento, (para este caso, se suspendió el proceso hasta un espesor aproximadamente de 15.5 [mm] debido a que en ningún momento se presentó indicio alguno de desprendimiento del recubrimiento) teniendo en cuenta estas consideraciones, pero sí se observa una gran irregularidad del recubrimiento a un mayor espesor.

De acuerdo a los parámetros y características ya mencionados en este proceso:

Velocidad de avance lineal de la pistola de alambre: 34.5 [m/min]

Velocidad de deposición: 11.4 [g/min]

Eficiencia de deposición: 37.8%.

➤ Pruebas de microdureza Vickers.

Las pruebas de microdureza Vickers fueron realizadas en la zona cercana y más alejada del espesor de recubrimiento con respecto a la superficie proyectada, figura 7.16.

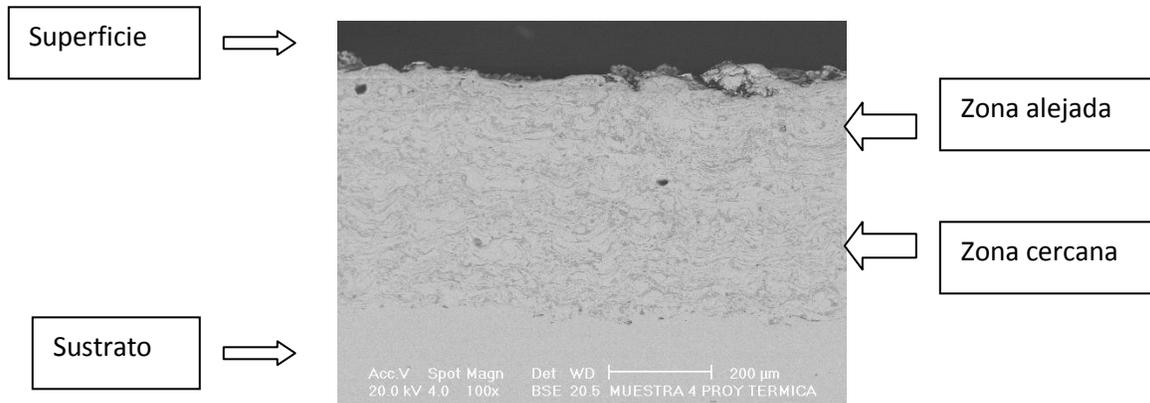


Fig. 7.16 Zonas de medición de microdureza. BSE, 100x.

La tabla 7.17 muestra los valores característicos obtenidos en las mediciones de microdureza Vickers con carga de 50g

Número de probeta	Tiempo de proyección [min]	Microdureza en zona alejada [Vickers]	Microdureza en zona cercana [Vickers]
3	0.50	456.7	459.4
4	1.00	474.3	418.2
5	1.50	497.0	439.3
6	2.00	478.0	452.7
7	2.50	442.0	395.3
8	3.00	510.6	457.0
9	4.00	478.0	474.3
10	5.00	432.3	452.6
11	7.00	485.0	485.0
12	10.0	540.0	464.7
13	13.0	442.5	447.8
14	17.0	436.0	384.0
15	30.0	452.3	374.5

Tabla 7.17 Valores característicos de microdureza Vickers.

En las probetas número 1 y 2 no fue posible realizar la medición de microdureza debido a la delgada capa de recubrimiento obtenido.

El valor promedio de microdureza en la zona alejada al sustrato es de 471.13 [Vickers]

El valor promedio de microdureza en la zona cercana al sustrato es de 438.79 [Vickers]

El valor promedio de microdureza del sustrato fue de 90 [Vickers], la figura 7.18 muestra las curvas características de microdureza obtenidas.

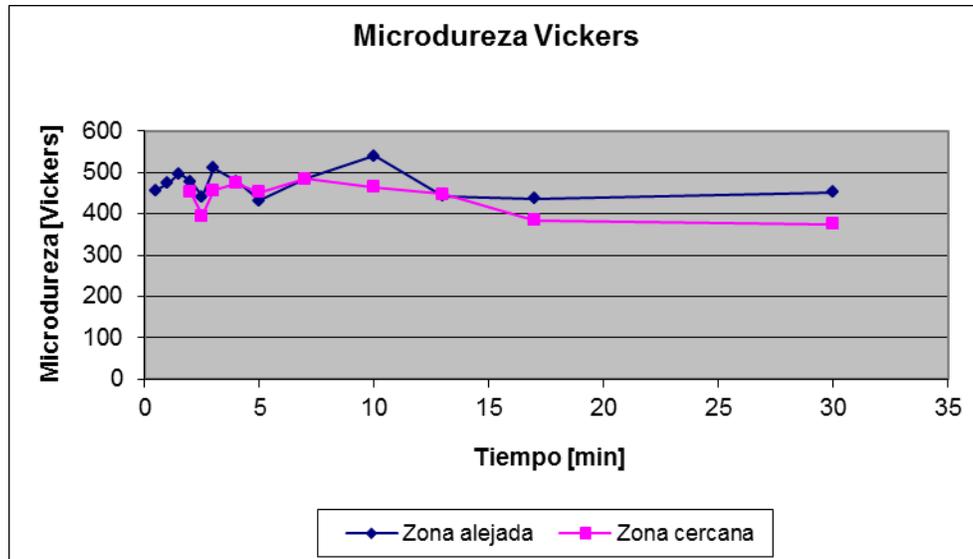


Fig.7.18 Curvas características de microdureza Vickers en zonas: alejada y cercana.

En general, las pruebas de microdureza Vickers realizadas en las dos zonas de las probetas (zona alejada y cercana al sustrato) no presentaron diferencia significativa entre si, un promedio de 30 [Vickers] de mayor dureza en la zona alejada.

La microdureza en la zona cercana y en la zona alejada al sustrato es equivalente en escala Rockwell “C” a 44 y 47 [HRc] respectivamente, éste promedio de dureza favorece al acero AISI 420 a ampliamente utilizado en equipos de cuchillería, y en combinación de su resistencia a la oxidación es catalogado como grado médico siendo utilizado en equipos de instrumentación.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a la experimentación realizada, podemos concluir que se cumplió el objetivo planteado, así como la obtención de recubrimientos homogéneos de espesor controlado.

En el proceso de granallado, el parámetro de rugosidad es determinante para la obtención del recubrimiento deseado, esta rugosidad se obtiene al trabajar con los siguientes parámetros:

- Presión de aire a la salida del compresor: 7 [Bar]
- Distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato: 1 [in]
- Tiempo de granallado: 2 [min]
- Velocidad de la pistola de granallado respecto a la superficie del sustrato: 50.8 [cm/min]

En el proceso de proyección térmica, el parámetro determinante es la distancia entre la boquilla del equipo de proyección térmica y la superficie del sustrato, esta distancia es aceptable dentro del siguiente intervalo:

- No menor a 9 [in] y no mayor a 11 [in], siendo la distancia a 10 [in] la más recomendable a trabajar debido a que proporciona una mejor calidad en el recubrimiento depositado.

La obtención de los parámetros determinantes anteriores fue la base para obtener satisfactoriamente el recubrimiento superficial propuesto al inicio en el objetivo de este trabajo.

Cabe señalar que el incremento de espesor de recubrimiento sobre el sustrato es prácticamente homogéneo y lineal hasta un espesor aproximadamente de 3.5 [mm] con un tiempo de proyección de 13 [min], es posible continuar incrementando el espesor, teniendo en cuenta las características que se presentan, debido a que cada vez que se rocía una cantidad de alambre la superficie resultante presenta un nuevo grado de rugosidad que favorece, sin duda, al anclaje del próximo rociado, pero con un grado mayor de irregularidades que no favorece a la homogeneidad de la superficie ni a la morfología interna.

Estas irregularidades son la principal desventaja del proceso al sobrepasar el límite de espesor de recubrimiento homogéneo, que con este trabajo se propone a 3.5 [mm].

Se logró superar el espesor de recubrimiento, que teóricamente debería de haberse desprendido del sustrato a un espesor aproximado de ¼ [in] (aproximadamente 6.3 [mm]), esto fue posible debido al proceso de preparación de la superficie a recubrir, al debido control de la temperatura y a la obtención de los parámetros del proceso.

En comparación al proceso de proyección térmica por polvos, se logró disminuir considerablemente el contenido de porosidades e inclusiones, siendo así, una opción

efectiva para la aplicación de recubrimientos, sobre todo debido a la relativa rapidez con que se obtienen espesores de mayor dimensión y a la inversión en cuanto a costo que continua siendo, entre su ramo, una opción conveniente por no ser tan elevado.

Dadas las características del acero inoxidable utilizado, es posible realizar un tratamiento térmico posterior al rociado para modificar sus propiedades mecánicas. Ver apéndice A2, diagrama 2.

El espesor de recubrimiento obtenido en la probeta de la figura 7.12 da a este proceso la posibilidad de obtener recubrimientos, más allá de una restauración dimensional, que sean parte del mismo sustrato, esto es, puede ser generada una nueva pieza o parte de ella debido a la facilidad con que se crea un volumen significativo para la generación de una pieza de material aplicado por rociado que puede permitir, a partir de ella, la obtención de piezas por procesos de corte.

La calidad del recubrimiento obtenido da pauta para pensar que con la automatización del proceso es posible generar recubrimientos con espesores aun mayores y parámetros de nuevas aplicaciones en diferentes campos de la ingeniería.

La principal aplicación de este proceso utilizando acero inoxidable AISI 420, que por su composición es considerado como acero inoxidable de grado médico, es en el campo de la instrumentación médica, ya sea proporcionando una superficie de protección contra corrosión, oxidación o al desgaste, realizando el recubrimiento para la recuperación dimensional de piezas o como se mencionó anteriormente para la generación de una nueva pieza o parte de ella.

En el campo de recuperación dimensional de piezas queda en evidencia la viabilidad de la aplicación del proceso, principalmente en cuanto a costos, mediante el ejemplo del análisis de costos de recuperación dimensional de la superficie de un disco (ver apéndice A3), de un freno de disco para automóvil, el cual provee un ahorro económico aproximadamente del 40% comparado con la adquisición de un disco nuevo.

## AI. PARAMETROS PARA EL EQUIPO DE METALIZADO SPRAY JET-96



### PARAMETROS PARA LA PISTOLA DE METALIZADO SPRAY JET-96

Código de Alambre	Metal	Refacciones recomendadas			Presión de Encendido			Lectura de Flujoómetro de Gases		Consumo por Hora			Alambre Requerido por Recubrimiento (Kg por cm <sup>2</sup> )	Velocidad de Depósito (cm <sup>2</sup> / hr)	
		Tamaño de Boquilla y Alambre (mm)	Casquete de Aire	Engranajes	Oxígeno (Kg/cm <sup>2</sup> )	Acetileno (Kg/cm <sup>2</sup> )	Aire (Kg/cm <sup>2</sup> )	Oxígeno	Acetileno	Alambre (Kg)	Oxígeno (m <sup>3</sup> )	Acetileno (m <sup>3</sup> )			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Aluminio	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	43	40	5.4	2.3	1.1	0.0028	1966	
710053 (04T)	Babbitt	3.17 (1/8")	EC	HIGH	2.41	2.07	1.03	4.83	28 29	28 29	41 18	1.4 1.2	1.1	0.0097	4179 1965
	Latón	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	10.9	2.4	1.1	0.0097	1147	
	Molibdeno	3.17 (1/8")	EC	STD	2.41	1.03	4.83	50	35	3.4	2.7	0.86	0.011	328	
710151 (10T)	Bronce Aluminizado	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	6.8	2.4	1.1	0.0097	705	
CAC-05T	Cobre	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	10.9	2.4	1.1	0.0097	1147	
	Acero Inoxidable SSW2 y SSW5	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	5.9	2.4	1.1	0.0099	666	
	Monel	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	6.8	2.4	1.1	0.0097	666	
	Níquel Puro	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	44	40	4.5	2.4	1.1	0.0097	482	
	Acero al Carbón	3.17 (1/8")	EC	STD	2.07	1.03	4.83	46	43	5.9	2.5	0.91	0.0083	737	
	Estaño Puro	3.17 (1/8")	EC	HIGH	2.07	1.03	4.83	42	29	43.1	2.3	0.71	0.0097	6309	
P-8515 (02A)	Zinc 85 Aluminio 15	3.17 (1/8")	EC	HIGH	2.07	1.03	4.83	46	40 42	14.5 20.4	2.4	1.1	0.0097	1475 2130	
Brondite (79B)	Níquel Aluminio (Brondite)	3.17 (1/8")	C	STD	2.07	1.03	4.83	44	39	2.3	2.4	1.4	0.0083	262	

#### NOTAS:

Un cm<sup>2</sup> de recubrimiento equivale a:

- a) 100 cm<sup>2</sup> de superficie con 100 micrones de espesor (0.1 mm)
- b) 1000 cm<sup>2</sup> de superficie con 10 micrones de espesor (0.01mm)
- c) 40cm<sup>2</sup> de superficie con 250 micrones de espesor (0.25 00)

Para calcular la velocidad de recubrimiento en cm<sup>2</sup> / hr se deberán dividir los datos de la última columna por el espesor en cm que se desea.

**A2. CARACTERÍSTICAS Y DIAGRAMAS DEL ACERO INOXIDABLE:**  
*Fe 13Cr 0.5Si 0.5Ni 1Mn 0.35C (AISI 420)*

El alambre de acero inoxidable tipo 420 (SS-2, 1/8" diámetro) está hecho exclusivamente para el proceso de rociado térmico y puede ser rociado por cualquier equipo de metalizado por combustión.

Sus principales características son: Calidad en resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión con un bajo grado de contracción. El alto contenido de cromo provee resistencia a la oxidación a altas temperaturas. La alta dureza y resistencia al desgaste determinan las aplicaciones de este material, utilizándose en cuchillería, discos de freno, equipos quirúrgicos como bisturí, pinzas o tenazas y equipos odontológicos.

Dureza: Rc 30-35 aproximadamente.

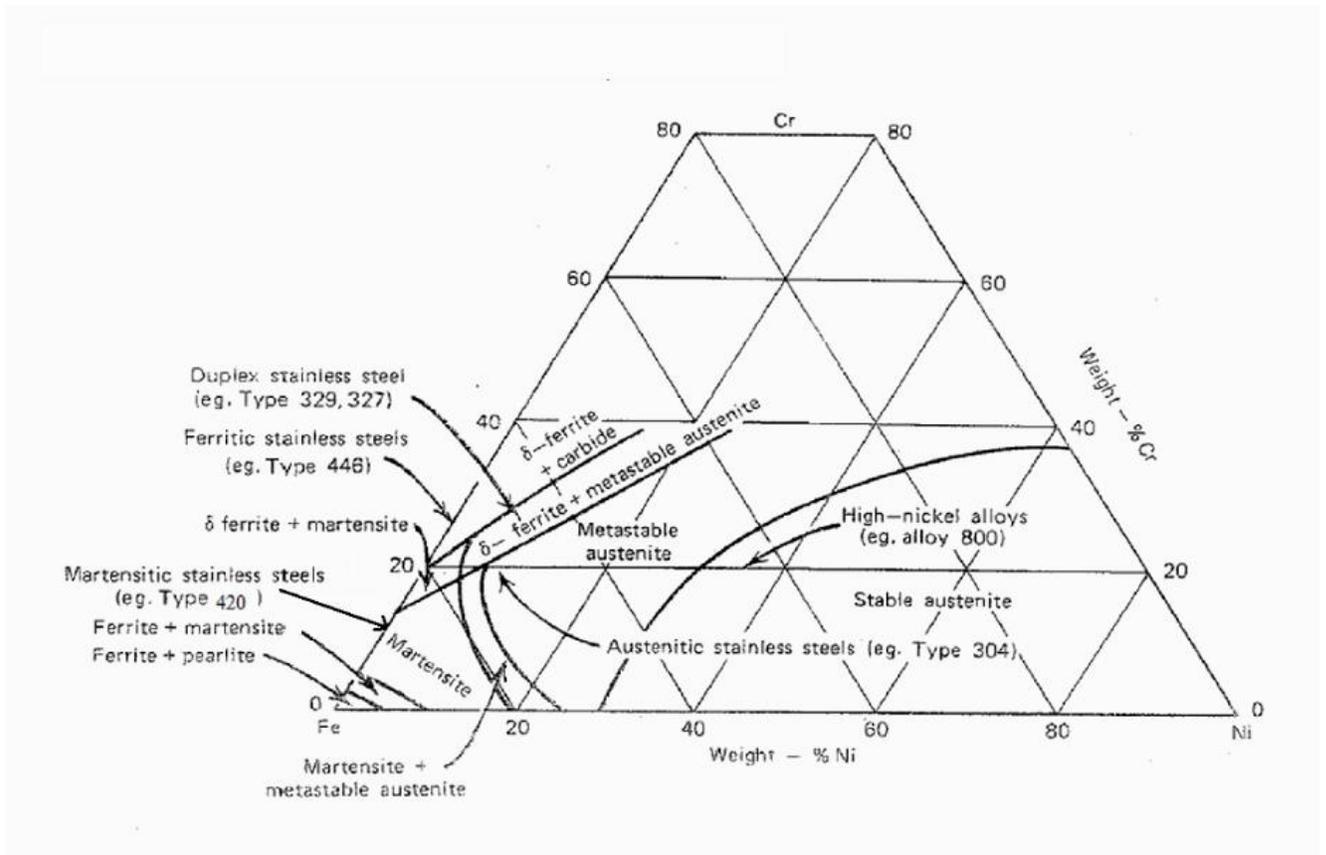


Diagrama 1. Diagrama de fases ternario Fe-Ni-Cr.<sup>87</sup>

<sup>87</sup> 1985.R. A. Lula. Stainless Steel. Carnes Publication Services, Ind. USA, 1993.

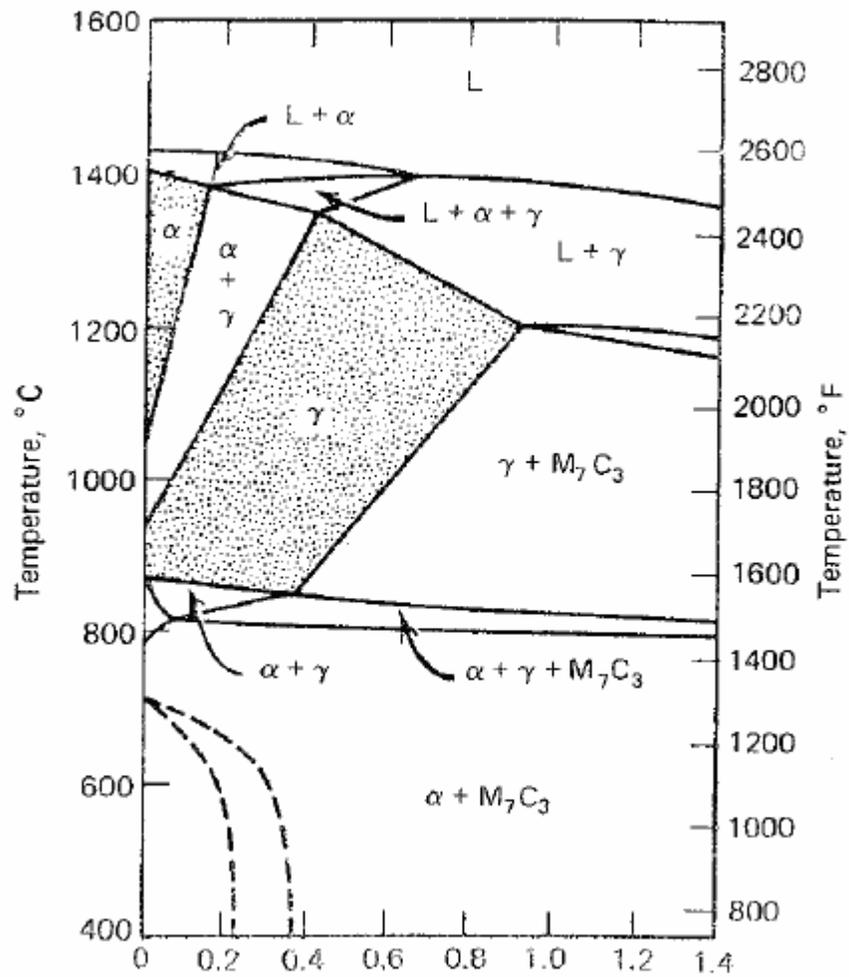


Diagrama 2. Diagrama de equilibrio Fe-C (Sección a 13% Cr).<sup>88</sup>

<sup>88</sup> Metals Handbook. 9a edición. Vol. 1. Properties and selection: Irons and steels. American society for metals. USA.

**A3. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE COSTO TOTAL APROXIMADO PARA LA RECUPERACIÓN DIMENSIONAL DE LA SUPERFICIE DEL DISCO DE UN FRENO DE DISCO DE AUTOMOVIL POR PROYECCIÓN TÉRMICA.**

Para calcular el costo total del proceso de proyección térmica de este ejemplo se debe tomar en cuenta lo siguiente:

El tiempo efectivo invertido en el proceso de proyección se calcula como se indica a continuación:

1. Determinar el volumen de material que se va a ser depositado de acuerdo al área de la superficie y el espesor deseado.

*Área de la superficie del disco:  $0.0353 \text{ [m}^2\text{]}$*

*Espesor de recubrimiento deseado:  $0.050 \text{ [in]} = 0.00127 \text{ [m]}$*

*Volumen:  $4.483 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]} = 44.83 \text{ [cm}^3\text{]}$*

2. Agregar 40% de material calculado debido a las pérdidas presentadas.

*Volumen más 40% por pérdidas:  $62.76 \text{ [cm}^3\text{]}$*

3. Dividir este volumen entre el valor de “Velocidad de Depósito” con referencia al material utilizado (información proporcionada por el proveedor del equipo, Flame Spray S.A. de C.V., ver apéndice 2)

*Velocidad de depósito del acero inoxidable SS2 (AISI 420):  $656 \text{ [cm}^3\text{/hr]}$*

*Tiempo efectivo del proceso de proyección:  $0.09567 \text{ [hr]} = 5.74 \text{ [min]}$*

**COSTO 1.** Tiempo de vida útil del equipo.

Promedio de vida del equipo: 10 años

24 hrs x 365 días = 8,760 hrs por año

8,760 hrs x 10 años = 87,600 hrs de vida útil.

Costo del equipo: \$100,000

$\$100,000.00 / 87,600 \text{ hrs} = \$1.14 / \text{hr}$

*Costo 1 =  $\$1.14 / \text{hr} \times \text{Tiempo efectivo de proyección}$ .*

*Costo 1 =  $\$0.11$*

**COSTO 2.** Costo de energía eléctrica.

El costo de energía eléctrica se considera por uso del compresor de aire. El consumo del compresor es de 2.98 kWh, la tarifa doméstica de alto consumo para la región central es de 3.22 \$ / kWh.

*Tiempo efectivo de proyección:  $0.09567 \text{ [hr]}$*

*Tiempo de granallado:  $2 \text{ [min]} = 0.03333 \text{ [hr]}$*

Costo de energía eléctrica =  $3.22 \text{ \$ / kWh} \times 2.98 \text{ kWh} = \$9.60 / \text{hr}$

$Costo\ 2 = \$9.60/hr \times (Tiempo\ efectivo\ de\ proyección + Tiempo\ de\ granallado)$

$Costo\ 2 = 1.24$

### **COSTO 3. Material.**

Multiplicar el volumen total de material a utilizar por el valor de Alambre requerido por recubrimiento (ver apéndice 2).

*Alambre requerido por recubrimiento para acero inoxidable SS2 (AISI 420): 0.0089 [kg/cm<sup>3</sup>]*

*Material a utilizar = 62.76 [cm<sup>3</sup>] x 0.0089 [kg/cm<sup>3</sup>]*

*Material a utilizar = 0.5585 [kg]*

*Costo de alambre de acero SS2 por kg: 13.5 dólares (Flame Spray S.A. de C.V)*

*Tipo de cambio actual: 1 dólar = \$12.66*

*Costo 3 = 0.5585 [kg] x 13.5 dólares*

*Costo 3 = 7.54 dólares = \$95.45*

### **COSTO 4. Costo de los gases.**

Para determinar el costo de los gases se considera el costo de carga de cada uno de los cilindros:

Oxígeno: \$437.00 por carga

Acetileno: \$1,247.95 por carga

El tiempo útil de la carga se determinó al trabajar con el equipo en diferentes tiempos tales como, el encendido de la pistola, ajustar niveles de presiones para el encendido, el precalentamiento de la pieza antes de la proyección y finalmente el tiempo de proyección. En el proceso experimental ambas cargas rindieron un tiempo aproximado de 150 minutos por lo tanto el costo total de las cargas es de \$1,684.95 y \$11.23/min

*Tiempo efectivo de proyección: 0.09567 [hr]= 5.74 [min]*

*Costo 4 = \$11.23 x Tiempo efectivo de proyección*

*Costo 4 = \$64.46*

### **COSTO 5. Costo de la granalla.**

La granalla utilizada para este proceso es “Granalla angular de óxido de aluminio café F-12 CH” utilizada si se trabaja con metales. La granalla utilizada se recupera al trabajarla. El costo de la granalla se considera por saco de 5kg que se reutiliza 4 veces, el costo por costal es de \$100.00, por lo que se agrega un 25% del costo.

*Costo 5 = \$25*

### **COSTO 6. Mano de obra.**

El costo por mano de obra se considera especializado, \$500/hr

$Costo\ 6 = \$500/hr \times (Tiempo\ de\ granallado + Tiempo\ de\ proyección) + 0.5\ [hr]\ de\ tiempo\ de\ preparaciones.$

*Costo 6 = \$314.5*

***COSTO TOTAL = \$500.76***

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) J.R Davis & Associates. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004
- 2) Handbook of thermal spray technology. 1a edición. Vol. 6. ASM International. Metals Park. OH. USA, 2004.
- 3) Kirk, Othmer. Encyclopedia of chemical technology. 3a edición. Ed. Board. Canada, 1979.
- 4) Metals Handbook. 9a edición. Vol. 1. Properties and selection: Irons and steels. American society for metals. USA, 1985.
- 5) R. A. Lula. Stainless Steel. Carnes Publication Services, Ind. USA, 1993.
- 6) William D. Calliester Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Reverté, 5a reimpresión, Barcelona 2001.
- 7) Donald R. Askeland. La ciencia e ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1987
- 8) Combustion Wire Spray Gun, WIREJET-96 “Operating Manual” 2009
- 9) Thermal Spray Materials Guide, Sulzer Metco, Feb. 2006.
- 10) Plasma powders and systems, Inc. SS2 1/8” dia. High Chromium 420 tipe stainless steel wire, “Specifics”.
- 11) [www.sulzermetco.com](http://www.sulzermetco.com)
- 12) [www.flamespray.com.mx](http://www.flamespray.com.mx)
- 13) [www.fi-p.unam.mx/simposio\\_investigacion2dic04/modificacion\\_extenso.html](http://www.fi-p.unam.mx/simposio_investigacion2dic04/modificacion_extenso.html)
- 14) [www.inoxidable.com/tablas\\_utiles.htm](http://www.inoxidable.com/tablas_utiles.htm)