



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Caracterización del proceso de proyección térmica por flama
en aceros de bajo carbono

Tesis Profesional que para obtener el Título de
INGENIERO MECÁNICO

presentan:

Marco Antonio Raygoza Olivares
Raúl Gilberto Valdez Navarro

Asesor: M.I. Eduardo Garduño

México D.F. , 2006





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.

Hipótesis

“Ningún equipo de proyección térmica especifica los parámetros de procesamiento para la obtención de un recubrimiento sobre un sustrato en particular, debido a la gran cantidad de combinaciones de materiales que pueden constituir el recubrimiento y el sustrato, además de las condiciones de procesamiento particulares de estas combinaciones. Es entonces necesario y muy conveniente, encontrar los rangos en los cuales dichos parámetros generen calidad y repetibilidad en los recubrimientos para una combinación específica, con la pretensión de procesarlos de manera automatizada con fines de producción industrial”.

Objetivos

- Realizar una investigación documental acerca de los procesos de proyección térmica existentes, con el objeto de mostrar su potencial como una buena alternativa en relación a algunos procesos tradicionales de obtención de recubrimientos en aplicaciones específicas.
- Ilustrar experimentalmente la interrelación de algunos parámetros importantes en el procesamiento para la obtención de un recubrimiento antidesgaste de NiCrBSiFe autofundente mediante proyección térmica por flama:

- 1) distancia de rociado.
- 2) ángulo de rociado.
- 3) número de pasadas.
- 4) gasto de polvo a proyectar.

Dicha interrelación servirá para encontrar tendencias que conduzcan a la obtención de recubrimientos de mayor calidad y repetibilidad que aquellos obtenidos por procesamiento manual.

Alcances

- Dotar a los alumnos de la asignatura de Ingeniería de Superficies y de otras asignaturas de una referencia bibliográfica muy completa y elaborada del tema así como de material audiovisual.
- Marcar la pauta para la realización de experimentos con el equipo disponible.
- Proporcionar a la comunidad un banco de pruebas seguro y confiable para el desarrollo de sus experimentos y aplicaciones.

ÍNDICE

HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y ALCANCES.
INTRODUCCIÓN.

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

	Página
1.1 LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA CONTRA OTROS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE RECUBRIMIENTOS	2
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	8
1.4.1 SPLAT	9
1.4.2 INCLUSIONES DE ÓXIDO	12
1.4.3 MINIMIZACIÓN DE INCLUSIONES	13
1.4.4 POROSIDAD	13
1.4.5 FUENTES QUE ORIGINAN LA POROSIDAD	15
1.4.6 CONTROL DE LA POROSIDAD	18
1.5 PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA	18
1.6 FUNCIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA	21
1.6.1 RECUBRIMIENTOS ANTIDESGASTE	21
1.6.2 AISLAMIENTO TÉRMICO	22
1.6.3 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	23
1.6.4 RECUBRIMIENTOS DELIBERADAMENTE DESGASTABLES Y RECUBRIMIENTOS RESISTENTES A LA ABRASIÓN	23
1.6.5 RECUBRIMIENTOS ELÉCTRICAMENTE CONDUCTORES Y RECUBRIMIENTOS ELÉCTRICAMENTE RESISTIVOS/ AISLANTES	25
1.6.6 RECUBRIMIENTOS PARA LA RESTAURACIÓN DIMENSIONAL	25
1.6.7 RECUBRIMIENTOS PARA USO MÉDICO	27
1.6.8 RECUBRIMIENTOS POLIMÉRICOS	27
1.7 MATERIALES PARA PROYECCIÓN TÉRMICA	28
1.7.1 MATERIALES DE FASE SIMPLE	28
1.7.2 MATERIALES COMPUESTOS Y CERMET	29
1.7.3 MATERIALES DE GRADIENTE FUNCIONAL	29
1.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVOS	30
1.8.1 TAMAÑO DE PARTÍCULA	30
1.8.2 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	31
1.8.3 MORFOLOGÍA DE LOS POLVOS	31
1.8.4 DENSIDAD Y FLUIDEZ	32
1.8.5 CONTENIDO DE HUMEDAD	33
1.8.6 PULSOS EN LA ALIMENTACIÓN DE POLVOS	33
1.9 PRODUCCIÓN DE POLVOS METÁLICOS	33
1.10 TÉCNICAS QUÍMICAS PARA POLVOS CERAMICOS	34
1.11 RELACIÓN ENTRE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS POLVOS Y LAS PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS	34

CAPITULO 2. PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA

2.1 PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA	36
2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	36
2.1.2 EQUIPO	38
2.1.3 COMPONENTES	38
2.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR PROYECCION TERMICA	38
2.2 PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR DETONACIÓN	39
2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO Y EQUIPO	39
2.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO OBTENIDO POR ESTE PROCESO	40
2.2.3 D-GUN® CONTRA OTROS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA	41
2.3 PROYECCIÓN TÉRMICA POR COMBUSTIÓN DE ALTA VELOCIDAD	42
2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	42
2.3.2 EQUIPO Y COMPONENTES	44
2.3.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO	48
2.4 PROYECCIÓN POR ARCO ELÉCTRICO	50
2.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	50
2.4.2 EQUIPO	53
2.4.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO	55
2.5 PROYECCIÓN POR PLASMA	57

2.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.....	57
2.5.2 EQUIPO.....	60
2.5.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO.....	61
2.6 PROCESO DE ROCIADO EN FRÍO (COLD SPRAY).....	63
2.6.1 EQUIPO PARA ROCIADO EN FRÍO Y SUS PARÁMETROS DE PROCESO.....	65
2.6.2 EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL RECUBRIMIENTO.....	66
2.6.3 MATERIALES CON LOS QUE ESTÁN HECHOS LOS RECUBRIMIENTOS PARA ROCIADO EN FRÍO Y SUS APLICACIONES.....	67
2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES DE LOS PROCESOS PROYECCIÓN TÉRMICA.....	68
2.7.1 VENTAJAS.....	68
2.7.1.1 ÁREAS DE FUTURO CRECIMIENTO.....	73
2.7.2 DESVENTAJAS.....	73

CAPITULO 3. OPERACIONES PREVIAS A LA APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA

3.1 PROCESAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO.....	75
3.2 METALURGIA E HISTORIA TÉRMICA DE LOS SUBSTRATOS.....	75
3.3 ACEROS ALEADOS Y AL CARBONO.....	75
3.4 ACEROS INOXIDABLES Y ALEACIONES DE NÍQUEL.....	76
3.5 ALEACIONES DE ALUMINIO, COBRE, MAGNESIO Y TITANIO.....	76
3.6 COMPONENTES FUNDIDOS O POR METALURGIA DE POLVOS.....	76
3.7 CONFIGURACIÓN DE LA PIEZA Y LOCALIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO.....	76
3.8 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.....	79
3.8.1 LIMPIEZA.....	79
3.8.2 RUGOSIDAD.....	80
3.8.3 RÁFAGAS DE PERDIGONES EN SECO.....	81
3.8.4 VARIABLES DE LAS RÁFAGAS DE PERDIGONES.....	82
3.8.5 EQUIPO USADO PARA LA ABRASIÓN CON RÁFAGAS DE PERDIGONES.....	84
3.8.6 ABRASIVOS.....	86
3.9 CUANDO COMENZAR A PROYECTAR.....	89
3.10 APLICACIÓN DE UNA CAPA DE ADHESIÓN.....	89
3.10.1 MATERIALES EN LOS QUE LAS CAPAS DE ADHESIÓN SON AUTO-ADHERIBLES.....	89
3.10.2 MATERIALES EN LOS QUE LAS CAPAS DE ADHESIÓN NO SON AUTO-ADHERIBLES.....	90
3.10.3 MECANISMO DE ADHESIVIDAD.....	90
3.11 ¿POR QUÉ USAR UNA CAPA DE ADHESIÓN?.....	91
3.11.1 DISPONIBILIDAD DE MATERIALES DE CAPAS DE ADHESIÓN.....	91
3.12 SOCAVACIÓN (DURANTE LA REPARACIÓN Y RESTAURACIÓN DIMENSIONAL).....	91
3.13 ENMASCARAMIENTO.....	92
3.13.1 MÁSCARAS DE SOMBRAS DE METAL.....	92
3.13.2 MÁSCARAS DE CINTA.....	93
3.13.3 CONFIGURACIONES ESPECIALES DEL ENMASCARAMIENTO.....	94
3.13.4 COMPUESTOS PARA ENMASCARAR.....	94
3.14 PRECALENTAMIENTO.....	95
3.14.1 TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO.....	95
3.14.2 EQUIPO.....	95
3.14.3 MATERIALES QUE NO DEBEN SER PRECALENTADOS.....	95
3.14.4 ACERO INOXIDABLE, SUPERALEACIONES Y ALEACIONES BASE NÍQUEL.....	95
3.14.5 ATMÓSFERAS INERTES.....	95

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

4.1 PATRÓN DE ROCIADO.....	96
4.1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DEL PATRÓN DE ROCIADO.....	96
4.2 CONTROL EN EL AUMENTO EN EL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.....	98
4.2.1 MICROESTRUCTURA TÍPICA DEL RECUBRIMIENTO.....	98
4.2.2 EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LA PARTE EN EL AUMENTO DE ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.....	98
4.3 USO DE DISPOSITIVOS DE ENFRIAMIENTO POR AIRE PARA MINIMIZAR LAS IMPUREZAS.....	99
4.4 RELACIÓN ENTRE EL GRADO DE FUSIÓN DE LAS PARTÍCULAS Y LA ESTRUCTURA DEL RECUBRIMIENTO.....	99
4.4.1 CONTROL DE TEMPERATURA SUBSTRATO/RECUBRIMIENTO.....	100
4.4.2 DEGRADACIÓN DEL SUSTRATO.....	100
4.4.3 OXIDACIÓN.....	100
4.4.4 CONTRACCIÓN/EXPANSIÓN.....	100
4.4.5 MOVIMIENTO ENTRE LA ANTORCHA Y EL SUSTRATO.....	101

4.5 CONTROL DE LAS VARIABLES DE MOVIMIENTO.....	101
4.5.1 DISTANCIA BOQUILLA-SUSTRATO (STAND-OFF).....	101
4.5.2 PATRÓN DE ROCIADO NORMAL AL SUSTRATO.....	102
4.5.3 CONSUMO DEL MATERIAL DE ALIMENTACIÓN.....	102
4.5.4 MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE LA PIEZA DE TRABAJO Y LA BOQUILLA.....	102
4.5.5 CONSIDERACIONES PARA EL PROCESAMIENTO CON HVOF.....	102
4.5.6 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE BARRIDO.....	103
4.5.7 EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN.....	104
4.5.8 CÁLCULO DE EL CONSUMO ESTIMADO DE MATERIAL A PROYECTAR Y CÁLCULO DE LA TASA DE PRODUCCIÓN.....	104
4.6 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA SEGURIDAD DURANTE EL PROCESAMIENTO DE RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA.....	107

CAPITULO 5. OPERACIONES POSTERIORES A LA APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO

5.1 TRATAMIENTOS DE ACABADO.....	110
5.1.1 MAQUINADO.....	111
5.1.2 ESMERILADO.....	111
5.1.3 PULIDO.....	112
5.2 DENSIFICACIÓN.....	112
5.3 FUSIÓN.....	112
5.4 SELLADO.....	114
5.5 TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL.....	115
5.6 COMPRESIÓN ISOSTÁTICA EN CALIENTE.....	115
5.7 TRATAMIENTO TÉRMICO.....	115
5.8 VITRIFICACIÓN CON LÁSER.....	116
5.9 INSPECCIÓN.....	117
5.9.1 ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	117
5.9.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	118

CAPITULO 6. CONTROL DEL EQUIPO DE PROCESO

6.1 PARÁMETROS DEL PROCESO.....	119
6.1.1 LAS VARIABLES DE MANIPULACIÓN.....	119
6.1.2 LA VARIABLE DEL TIEMPO.....	119
6.1.3 LA TEMPERATURA.....	119
6.2 ALIMENTACIÓN DE MATERIAL.....	120

CAPITULO 7. EXPERIMENTOS

7.1 BANCO DE PRUEBAS.....	123
7.1.1 DIAMETRO EXPERIMENTAL DEL PATRÓN DE ROCIADO.....	123
7.1.2 GEOMETRÍA DE LA PROBETA EMPLEADA Y SU SUJECCIÓN.....	125
7.1.3 MEDIO PARA VARIAR LA DISTANCIA DE PROYECCIÓN.....	127
7.1.4 SOPORTE Y MOVIMIENTO DEL EQUIPO DE PROYECCION TÉRMICA.....	128
7.1.5 ACOPLAMIENTO DEL MOTOR AL TORMILLO DE BOLAS RECIRCULANTES.....	135
7.1.6 CONSIDERACIONES.....	138
7.1.7 TABLA DE EXPERIMENTOS.....	139

CAPITULO 8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

8.1 MICROGRAFIAS.....	144
8.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	145

CONCLUSIONES..... 149

APÉNDICE..... 150

BIBLIOGRAFÍA..... 179

INTRODUCCIÓN

Una superficie es una intercara entre un objeto sólido y sus alrededores, los cuales interactúan con dicho objeto a través de reacciones físicas o químicas, fuerzas mecánicas, electromagnéticas o de cualquier índole, transferencia de calor y de masa.

Los recubrimientos y las tecnologías de modificaciones de superficies permiten mejorar el desempeño, extender la vida y lograr la apariencia de los materiales usados en los componentes diseñados. Estas tecnologías han sido desarrolladas debido a las interacciones de los componentes manufacturados con otros componentes o con ambientes líquidos y/o gaseosos, lo cual conduce a una degradación prematura y fallas en el componente.

Las tecnologías de recubrimientos realzan el desempeño de los componentes mediante la aplicación selectiva de recubrimientos que cumplen funciones específicas sin comprometer la integridad de las ventajas que representa el material con el que está hecho el sustrato. El uso de recubrimientos para efectos anticorrosión, antidesgaste, decorativos, implantes de prótesis y aislamiento térmico o electromagnético se incrementan día a día. Conforme las necesidades tecnológicas de nuestra sociedad se vuelven más complejas, la implementación de modificaciones superficiales y el uso de recubrimientos adecuados se han vuelto cada vez más importante para la satisfacción de dichas necesidades.

Hoy en día existen varios métodos de aplicación de recubrimientos, y se vuelve importante conocer las ventajas que ofrece un método respecto a otro, por lo que adicionalmente a la teoría de los procesos se incluirá un estudio mas detallado respecto al proceso de proyección térmica por flama con que se dispone en la Facultad.

Por lo anterior, en el presente trabajo, que consta de 8 capítulos, se desarrolla un compendio de carácter introductorio de algunos de los métodos de aplicación de recubrimientos y se presentará un estudio obtenido experimentalmente que muestre la interrelación de algunos parámetros del proceso de proyección térmica por flama para la obtención de un recubrimiento antidesgaste de NiCrBSiFe autofundente.

En el capítulo uno se familiariza al lector con la fenomenología asociada a los procesos de proyección térmica.

En el capítulo dos se muestran los procesos de proyección térmica existentes con el fin de conocer sus alcances, limitaciones y aplicaciones de cada proceso con la finalidad de establecer criterios de selección para una aplicación específica.

En el capítulo tres se dan a conocer las operaciones previas a la aplicación de recubrimientos por proyección térmica y la importancia que tienen dichas operaciones en la calidad de dichos recubrimientos.

En el capítulo cuatro se identifican las variables y parámetros involucrados en la obtención de un recubrimiento por proyección térmica

En el capítulo cinco se dan a conocer las diferentes operaciones posteriores a la aplicación de un recubrimiento por proyección térmica para mejorar su calidad.

En el capítulo seis se explica la necesidad de automatizar los procesos de proyección térmica para obtener repetibilidad en la obtención de recubrimientos mediante estos procesos.

En el capítulo siete se muestra una serie de experimentos que permitieron relacionar el efecto de algunas variables en el procesamiento de recubrimientos por proyección térmica por flama.

En el capítulo ocho se presenta la información generada a partir de los experimentos y se analiza.

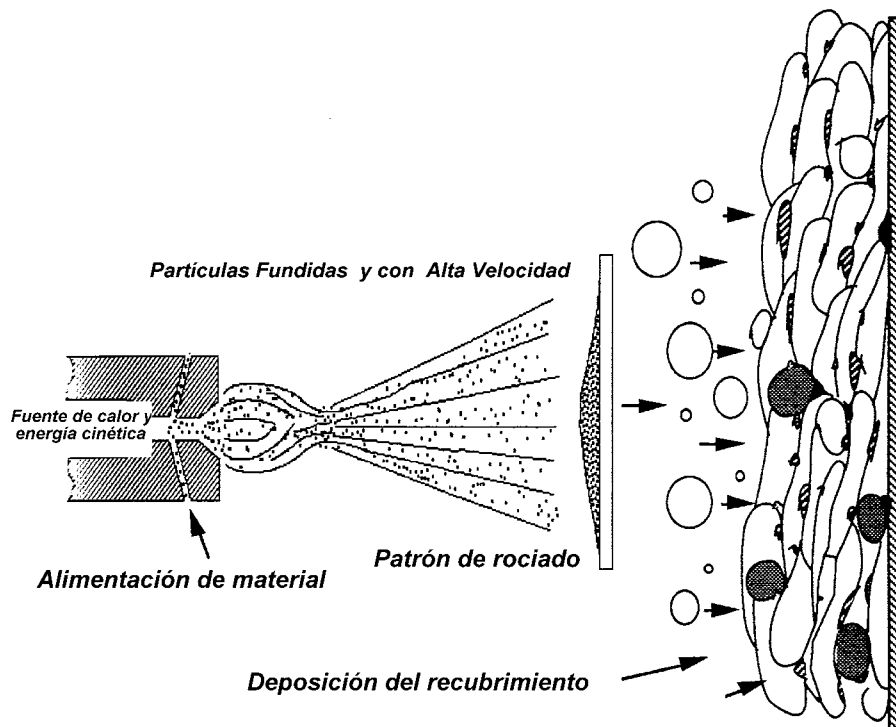
CAPITULO 1. RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA, TEORÍA Y EQUIPOS

Los recubrimientos han sido pensados como soluciones de ingeniería para mejorar las superficies en contra del desgaste, la corrosión, la degradación térmica y otros fenómenos superficiales.

Los recubrimientos de aceptable calidad se caracterizan generalmente por su buena adhesión y compatibilidad con el sustrato además de una baja porosidad.

Un proceso aceptable para recubrir también requiere ser compatible con las restricciones físicas del sustrato, tales como la geometría y la temperatura. Dichos requerimientos de la unión recubrimiento-sustrato incluyen un coeficiente de expansión térmica compatible entre ambos materiales, un apropiado radio en los bordes de la pieza o filetes, puntos de fusión y compatibilidad química durante el proceso de deposición y durante la vida en servicio de la pieza recubierta.

La proyección térmica puede ser empleada para satisfacer muchos de esos requerimientos. Los aspectos fundamentales de dicho proceso se ilustran en la siguiente figura, la cual muestra partículas impactándose sobre una superficie previamente preparada para formar una estructura laminar característica de los procesos de proyección térmica.



1.1 LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA CONTRA OTROS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE RECUBRIMIENTOS. [7]

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 yacen en un depósito dentro del equipo para proyección desde donde alimentan a una cámara en la que son calentados mediante la energía de un chorro de plasma, un arco eléctrico o una flama hasta alcanzar su punto de fusión. Habiendo alcanzado este estado, son entonces atomizados y rociados mediante un chorro de gas (dependiendo del proceso) o bien rociados por un chorro atomizado formado por un flujo de energía a través de la tobera del dispositivo.

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 proyección, lo cual permite la obtención de recubrimientos de espesores múltiples dentro del mismo sustrato.

Debido a que los procesos de proyección térmica son procesos de alta entalpía (alta densidad energética), 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.

Adicionalmente, los procesos de proyección y térmica son capaces de operar en un extenso rango de temperaturas, velocidades y condiciones atmosféricas, permitiéndoles ser aplicados en una gran variedad de materiales.

Otra ventaja de los procesos de proyección térmica incluye la capacidad de depositar recubrimientos gruesos en poco tiempo.

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

Característica	Electroplastia	Proyección Térmica	CVD	PVD
Costo del 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 de proceso	Solución acuosa	Al aire y en cámara de vacío	Al aire y en cámara de vacío	Al alto vacío
Geometría del recubrimiento	Omnidireccional	Limitado al área de impacto	Omnidireccional	Limitado al área de acción
Espesor del recubrimiento	De moderado a grueso: de 10µm a mm.	De 50 µm a cm	De 0.1 µm a mm	Muy delgado

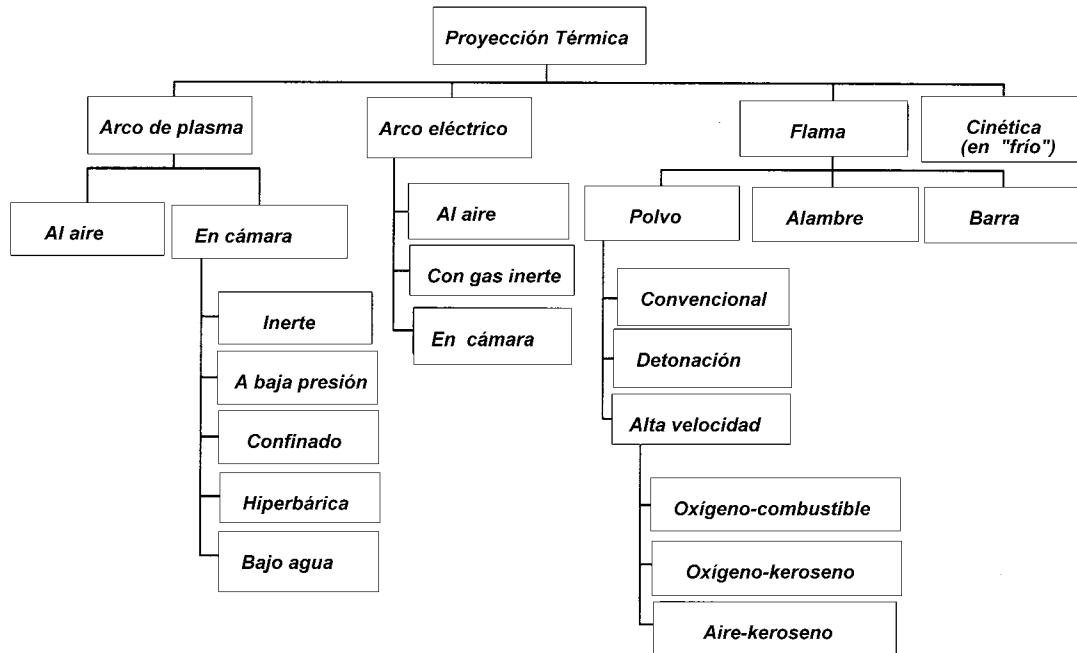
Temperatura del Sustrato	Baja	Baja a moderada	De moderado a alto	Baja
Adherencia	De adhesión mecánica moderada hasta muy buena adhesión química	Buena adhesión mecánica	De muy buena adhesión química a excelente adhesión por difusión	De moderada adhesión mecánica hasta buena adhesión química
Acabado Superficial	De moderadamente áspero hasta brillante	Desde áspera hasta suave	De suave a brillante	De suave hasta altamente brillante
Materiales que se usan como recubrimiento	Metales	Polímeros, metales y cerámicos	Metales, cerámicos y polímeros	Metales, cerámicos y polímeros

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 material base 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 las rapidísimas tasa de enfriamiento de las partículas fundidas. Dichas tasas de enfriamiento que ocurren durante el impacto, se deben al gran tamaño y la baja temperatura del sustrato en relación con el tamaño y la temperatura de las partículas.

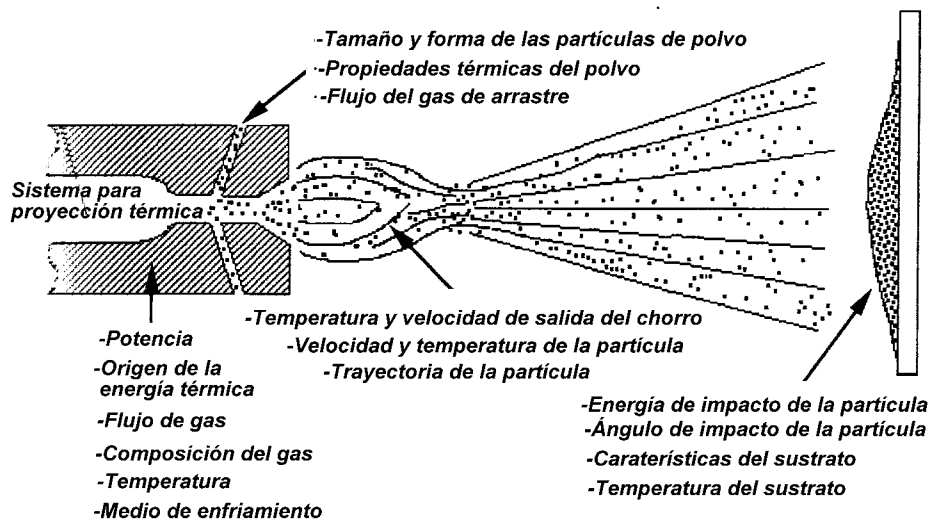
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA.

La siguiente figura ilustra los principales procesos de proyección térmica.



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: Esfuerzo de adhesión, porosidad, inclusiones (óxidos comúnmente) y dureza.

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESAMIENTOS [7]



La figura anterior 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.

Desde un punto de vista simplista, el proceso puede ser visto como un tratamiento térmico de alta velocidad (que involucra el tiempo, la temperatura y la masa), en donde el objetivo es llevar a la masa del polvo a una temperatura deseada durante un tiempo dado. El tiempo que emplea una partícula en la trayectoria del chorro se conoce como tiempo de permanencia (dwell time), el cual es gobernado por la velocidad del gas y las características de la partícula de polvo. La velocidad del gas es determinada por el flujo total del gas a través de la boquilla, las características del gas, y la energía que actúa o resulta del proceso. La velocidad de la partícula es entonces una función de la velocidad del chorro y a la vez es función de las características de la partícula (esto es, su tamaño, morfología y masa).

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 50,00 Btu). Los procesos HVOF (o de alta velocidad) generan entre 500 MJ y 1 GJ (500,000 y 1,000,000 Btu)

Los dispositivos de arco de plasma operan con energías de 72 a 720 MJ (200 a 200 kW), 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 135 MJ (37.5 kW).

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

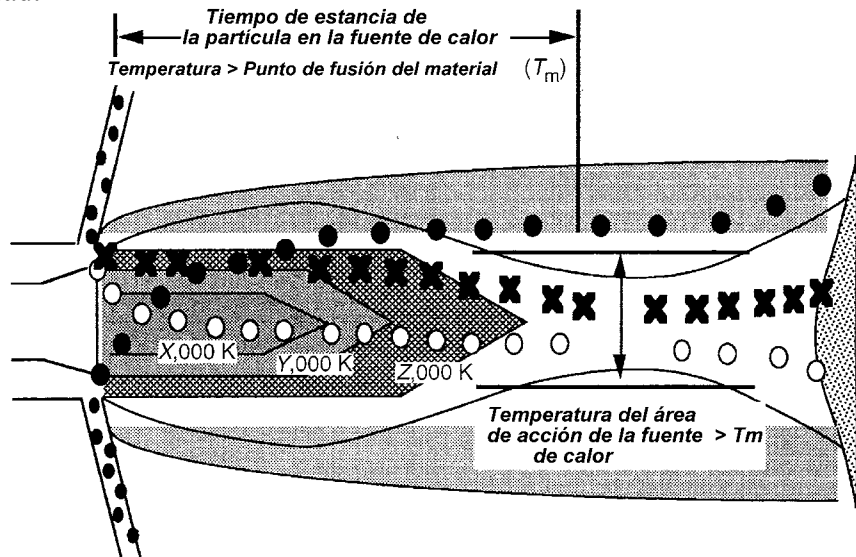
Ref.[9]

Atributo	Proyección por flama	HVOF	D-Gun	Arco Eléctrico	Arco de plasma al aire	Arco de plasma al vacío
<u>Chorro</u>						
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 ₂ , acetileno	CH ₄ ,C ₃ H ₆ ,H ₂ ,O ₂	O ₂ ,acetileno	Aire,N ₂ ,Argón	Ar,He,H ₂ ,N ₂	Ar,He,H ₂
Potencia suministrada, kW	20	150-300	.....	2-5	40-200	40-120
<u>Material de alimentación</u>						
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
<u>Recubrimiento obtenido</u>						
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

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. Está caída en 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 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 anterior ilustra esquemáticamente el “tiempo de estancia” de partículas hipotéticas, indicando 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.

Las distribuciones de partículas en estos chorros son aceleradas 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 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 altas 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 del 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 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 del 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 resistencia de adhesión, la porosidad y la formación de inclusiones tales como los óxidos. Esto es particularmente cierto cuando el proceso de proyección térmica se realiza al aire libre, en donde el tiempo y la 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.

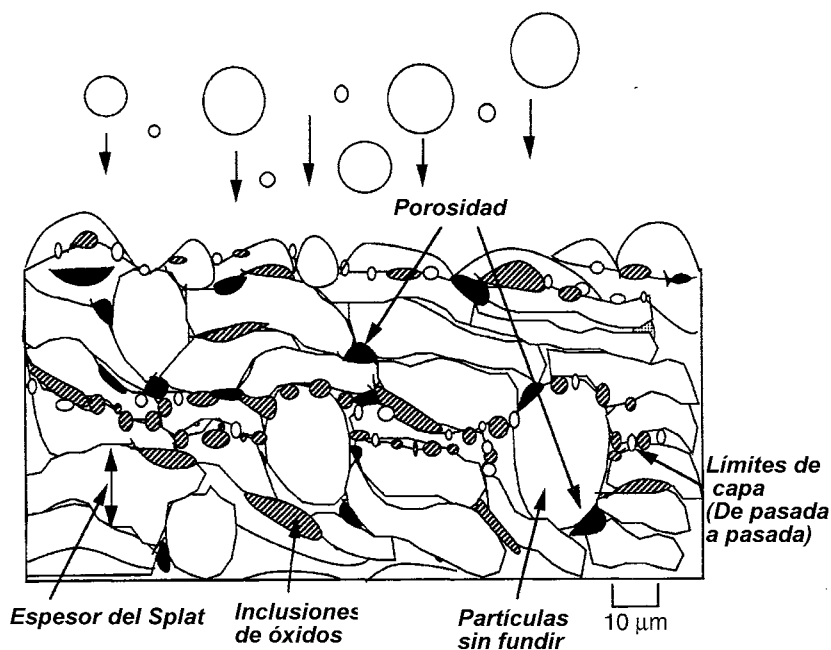
Las observaciones anteriores sólo son válidas si las partículas han sido calentadas en un chorro para proyección térmica. En los procesos de proyección térmica por arco eléctrico, conocidos también proyección térmica por arco con alambre, los materiales antes de ser proyectados se encuentran en presentación de 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 sólo sirve para enfriar a las partículas en los procesos de proyección por arco eléctrico, debido a que el chorro de partículas atomizadas sólo 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 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.

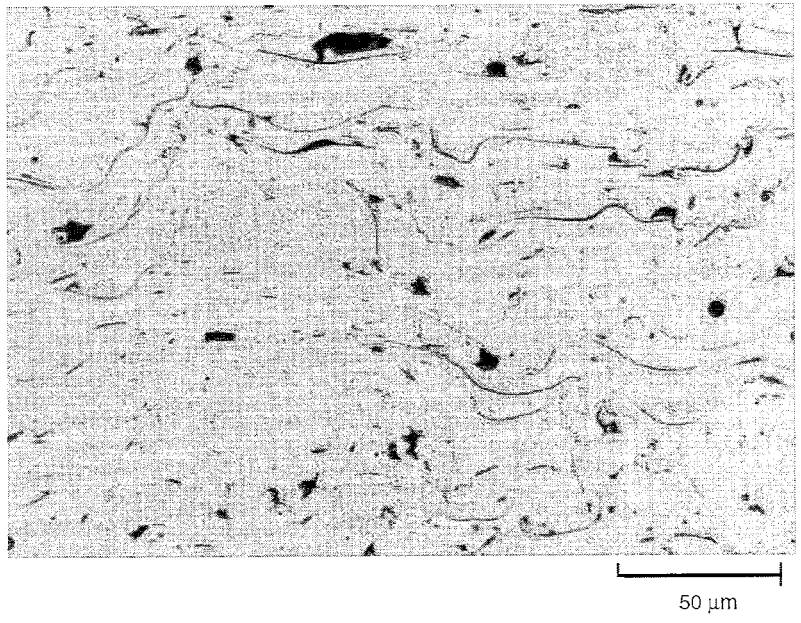
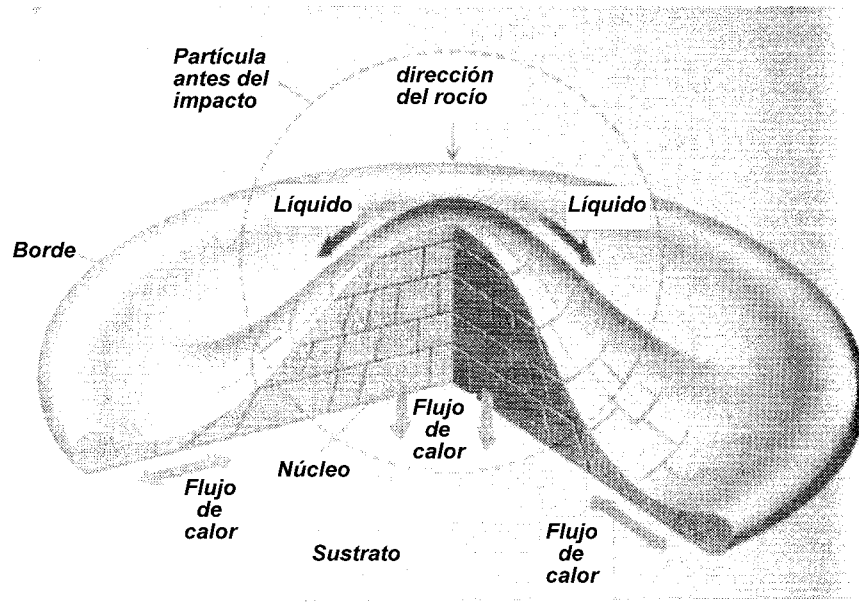
1.4 ESTRUCTURAS DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA, PROPIEDADES Y MATERIALES [8]

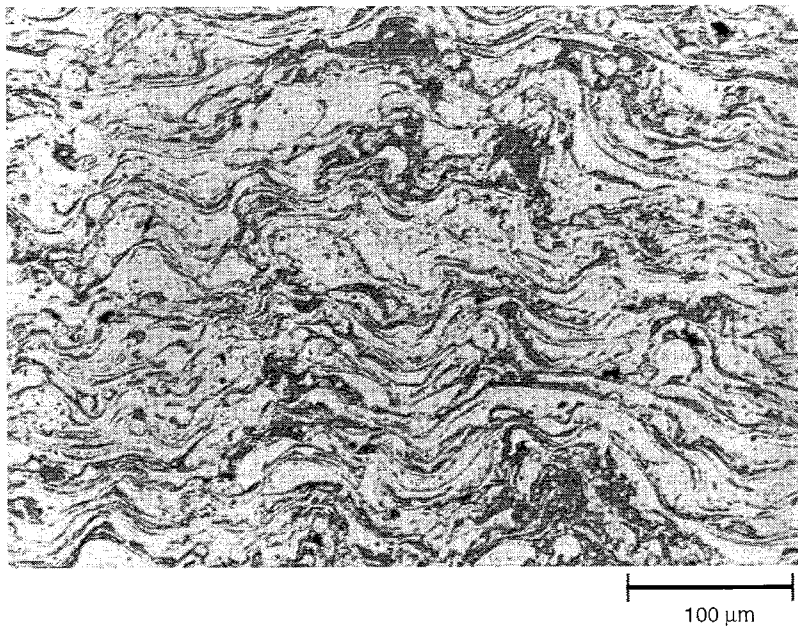
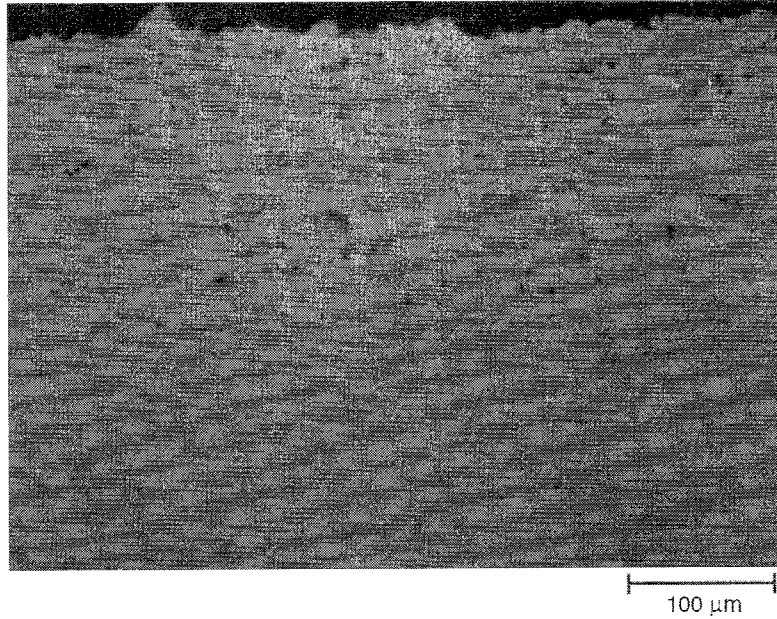
Los rasgos más importantes de un Recubrimiento por Proyección Térmica (RPT), cuya combinación determina las propiedades de dicho recubrimiento, incluyen la estructura laminar o estructura en capas formada por los “splats”, las partículas embebidas no fundidas o resolidificadas, los poros, las inclusiones de óxido, los granos, las fases presentes, las grietas y las intercaras de adhesión. La siguiente figura ilustra esquemáticamente las características típicas de un RPT y hace una representación de la microestructura de éste.



1.4.1 SPLAT [8]

“Splat” es un término que se refiere a una gota/partícula impactada, tal y como se ilustra en la siguiente figura. Varios splats superpuestos y contiguos se adhieren unos a otros para formar una capa continua del recubrimiento. De este modo, el splat es el elemento básico en la construcción del 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 siguientes. En estas figuras, los splats se ven por el borde, formando la estructura laminar característica de los RPT.





Las 2 figuras anteriores 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.

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 solidificado 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 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 RTP: estructuras splot y estructuras intrasplat.

Al interior de los splats, la rápida solidificación crea tamaños de grano inferiores a 5 [μm] y evita que muchos materiales alcancen sus fases de equilibrio, lo cual provoca propiedades anisotrópicas en el recubrimiento.

En la mayoría de los RTP, las propiedades en los planos XY, es decir, los planos paralelos a la superficie del sustrato, son las mismas. Sin embargo, en los planos XZ y YZ normales a la superficie del recubrimiento, las propiedades varían significativamente en relación a las presentadas en los planos XY.

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 RTP conducen a una homogeneidad composicional, representativa de las composiciones iniciales del material a proyectar.

1.4.2 INCLUSIONES DE ÓXIDO [8]

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) conduce 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 se van solidificando en forma de splats, tal y como se vio en las figuras anteriores.

Se ha encontrado que dichas inclusiones le añaden dureza al recubrimiento. La dureza propia de los óxidos excede 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 [8]

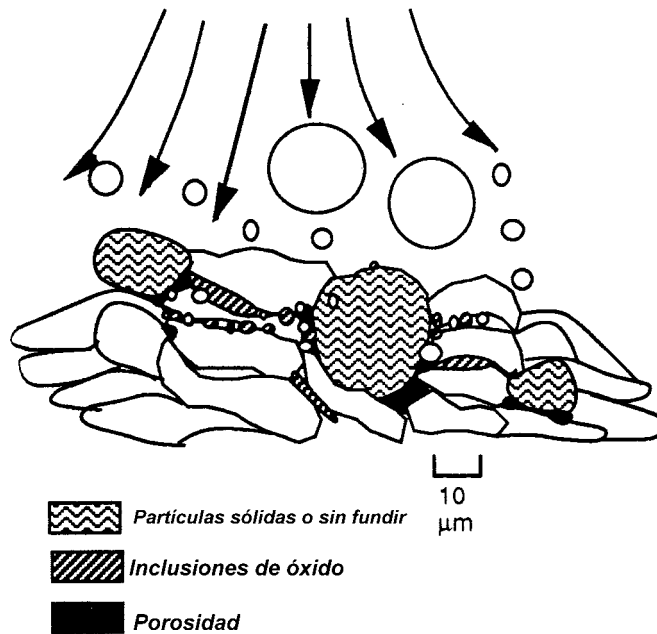
Las tendencias en los parámetros que minimizan a las inclusiones son:

- 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 permanencia, 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 área de su superficie / volumen, tienden a minimizar el contenido general de óxidos.

1.4.4 POROSIDAD [8]

La porosidad es otro importante rasgo de los recubrimientos que influye fuertemente en las propiedades de éstos. Tal y como ocurre con 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 corrosión.

La porosidad se asocia generalmente con un alto número de partículas sin fundir o bien, resolidificadas que quedan embebidas en el recubrimiento, tal y como se muestra en la siguiente figura.



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

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 típica 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 [μm]. Sobre algunas superficies para uso en cojinetes, los recubrimientos deben ser pulidos por debajo de 0.1 [μm], produciendo acabados tipo espejo.

La alta porosidad evita que esos acabados puedan ser alcanzados resultando en picaduras superficiales y pobres no uniformes acabados por maquinado.

A pesar de la baja 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.

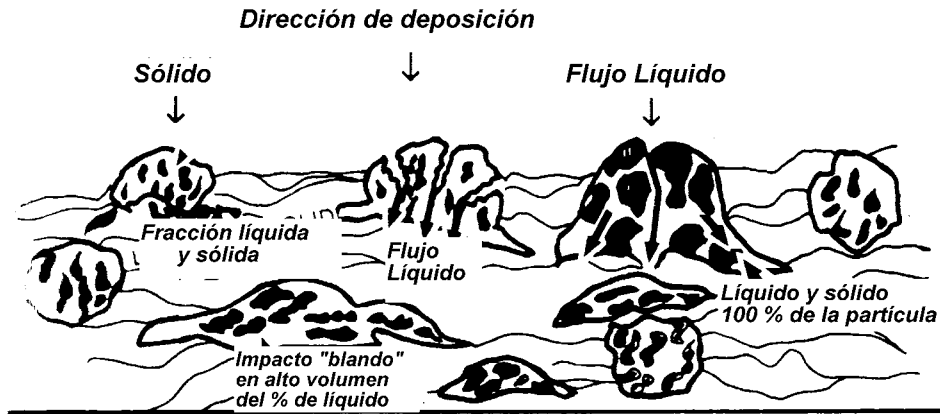
Las prótesis por implante médico son otra aplicación usual de los recubrimientos porosos, en donde hasta un 40% en porosidad es intencionalmente incluida. Dicha porosidad se usa para permitirle a la materia ósea crecer dentro del recubrimiento, lo cual acelera el proceso de sanación del paciente y disminuye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

1.4.5 FUENTES QUE ORIGINAN LA POROSIDAD [8]

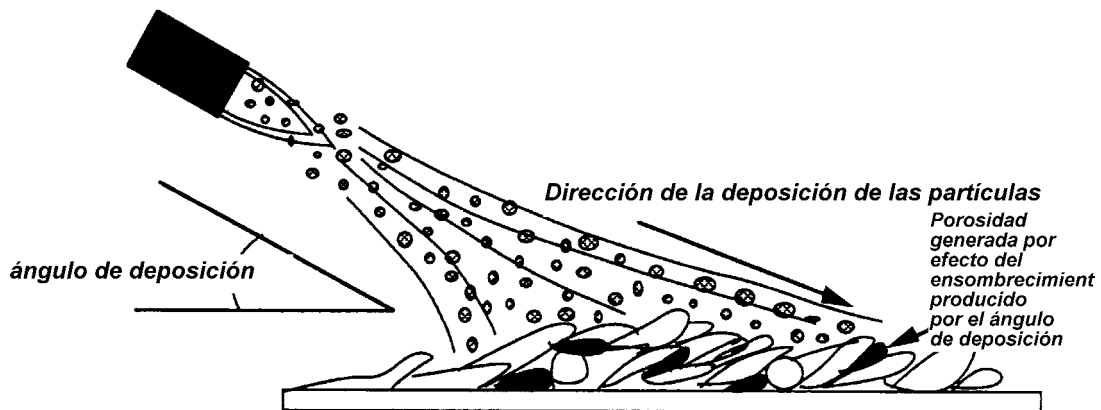
Debido a que la porosidad es un rasgo microestructural importante, sus orígenes deben ser bien entendidos y controlados. La porosidad puede originarse por:

- 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” producida por 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, tal y como se muestra en la siguiente figura.

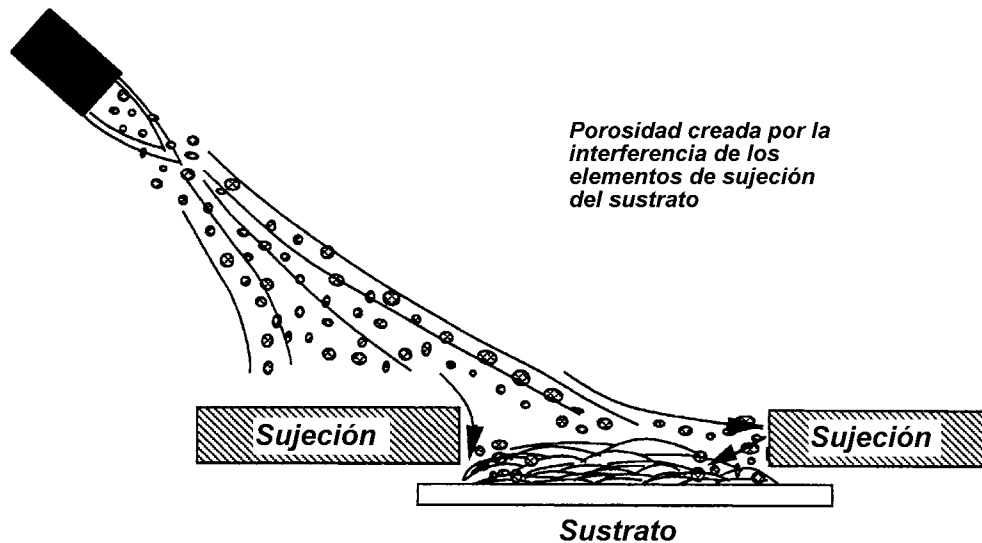


Las partículas sólidas, algunas de las cuales rebotan con el sustrato, pueden terminar adheriéndose en otra parte del sustrato o quedar embebido en él. Estas partículas no se adhieren bien o bien pueden no estar en contacto íntimo con los splats que yacen debajo de ellas, lo cual genera espacios vacíos 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 adonde apuntan sus boquillas, lo que éstas no puedan “ver”, no lo recubren tal y como sucede con los pequeños orificios. Es así como el siguiente arribo de partículas no puede llenar los espacios vacíos adyacentes a partículas sólidas atrapadas. En otros casos, aún en el mismo instante, algunas partículas semifundidas 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.



El ángulo de deposición o de incidencia del chorro de partículas es otra fuente de porosidad, debido al “ensombrecimiento”. La figura anterior 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°. 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 a $\pm 30^\circ$. La figura anterior 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 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 anterior. 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 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, lo cual conduce 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 esos efectos locales en los splats o actuar en gran escala, provocando macrogrietamientos 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 común de porosidad en muestras metalográficas, tanto en superficies recubiertas maquinadas o no maquinadas.

1.4.6 CONTROL DE LA POROSIDAD [8]

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 [8]

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

- Resistencia de adhesión con el substrato.
- 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 designada para el recubrimiento.

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:

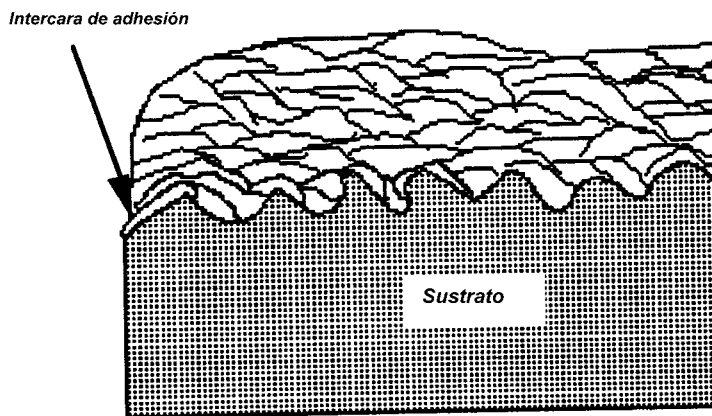
- Los esfuerzos residuales al interior del recubrimiento.
- Derretimiento y aleación localizada en el contacto entre las superficies de las partículas y entre el sustrato y las partículas colindantes.
- Difusión de especies elementales a través de los límites de cada splat.
- Fuerzas de atracción a nivel 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 en el que existen mayores discontinuidades en el sistema del material.

En los lugares donde los materiales son compatibles y las superficies 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 anterior, ha sido visto históricamente como el principal mecanismo de adhesión de los recubrimientos por proyección térmica. El entrelazamiento mecánico juega una parte en 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. En este caso, la adhesión entre el sustrato y las partículas impactadas se estabiliza grandemente mediante el impacto de partículas que

fluyen y solidifican alrededor de las 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, aceites 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 de proceso.

Después de la deposición de la primera capa del recubrimiento la cual se encuentra en contacto directo con el material base, los splats de la siguiente capa se adhieren a partir del impacto de las nuevas gotas sobre los splats ya resolidificados 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, 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 resistencia de adhesión se mide típicamente de acuerdo a la norma ASTM C 633-01 (“Método de prueba estándar para la adhesión y la 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 usando la norma ASTM C 633.

El comportamiento del recubrimiento es en última instancia el promedio de todos los rasgos estructurales 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 macropropiedades del recubrimiento, definiendo así el qué tan adecuado es el recubrimiento obtenido para una aplicación dada.

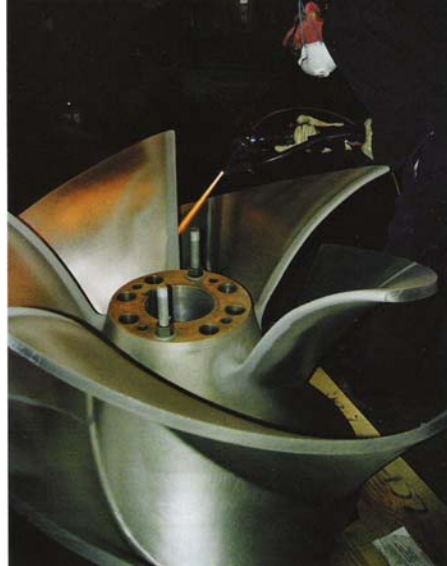
1.6 FUNCIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA

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 funciones, ya sea una sola o una combinación de estas funciones.

Dichas funciones 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 ANTIDESGASTE



Los RPT han sido usados para enfrentar varios mecanismos de desgaste incluyendo a la abrasión, la erosión, la cavitación, el ludimiento, el fretting y más. En la figura anterior 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 se integradas en dicho recubrimiento. Por ejemplo, los cermets pueden se

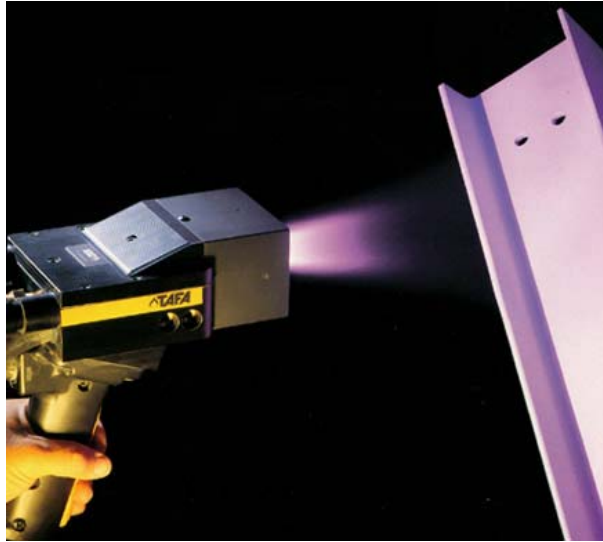
usados para combinar la alta resistencia al desgaste con la baja conductividad térmica. Materiales antiadherentes y materiales con bajo coeficiente de fricción pueden ser combinados con recubrimientos de alta dureza. Materiales anticorrosivos y materiales antidesgaste pueden ser combinados. Materiales 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 cermet de carburo de tungsteno-cobalto (WC/Co) como los 2 recubrimientos más comunes para este fin.

1.6.2 AISLAMIENTO TÉRMICO



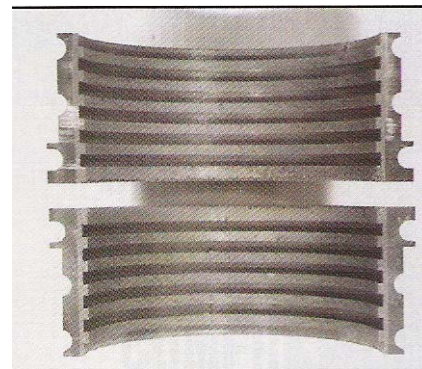
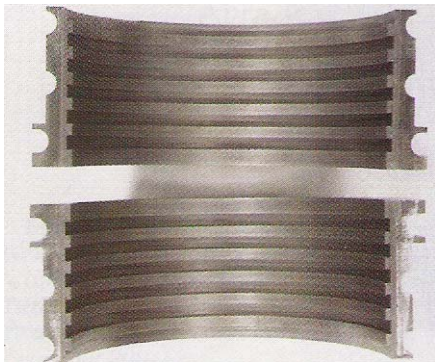
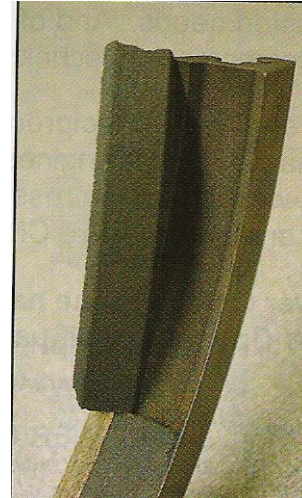
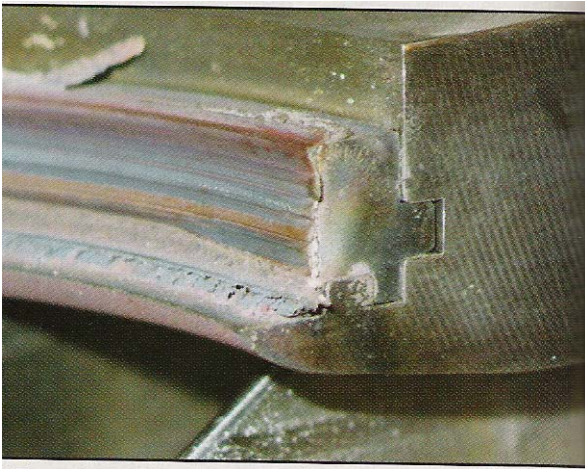
Los recubrimientos para barreras térmicas están hechos usualmente de zirconia de baja conductividad térmica y/o óxidos de aluminio, los cuales se depositan para reducir la conducción de calor hacia el sustrato. En la figura anterior se muestra una barrera térmica de zirconia estabilizada con itrio rociada con equipo de plasma para proteger a un álabe de turbina. Estos recubrimientos también pueden reducir el calor perdido, los efectos térmicos transitorios, y la corrosión/oxidación a alta temperatura mediante el mantenimiento del sustrato a una temperatura inferior. Los procesos por proyección térmica pueden introducir al sustrato niveles controlados de porosidad y microagrietamiento, 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 caústica. En la figura anterior se muestra un elemento estructural de acero siendo recubierto con zinc mediante un equipo de arco eléctrico. 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 DELIBERADAMENTE DESGASTABLES Y RECUBRIMIENTOS RESISTENTES A LA ABRASIÓN.



De las 4 figuras anteriores, en las 2 superiores se muestran el desgaste (derecha) y delaminación (izquierda) de un sello níquel-grafito y en las 2 inferiores se muestra un sello níquel-cromo (derecha) y níquel-grafito (izquierda). 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.

Los recubrimientos deliberadamente 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-grafito, 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 RECUBRIMIENTOS ELÉCTRICAMENTE RESISTIVOS/ 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. En la figura anterior se muestra un recubrimiento de aluminio sobre un varistor de metal-óxido obtenido por arco eléctrico. 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 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/Nb₃Sn y el Nb₃Sn.

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, la mullita, el silicato de aluminio, entre otros. Estos recubrimientos pueden ser aplicados en dispositivos de comunicaciones e instrumentos quirúrgicos, entre muchas otras aplicaciones

1.6.6 RECUBRIMIENTOS PARA LA RESTAURACIÓN DIMENSIONAL.



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



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



Recubrimiento de aluminio-bronce obtenido después de rociar



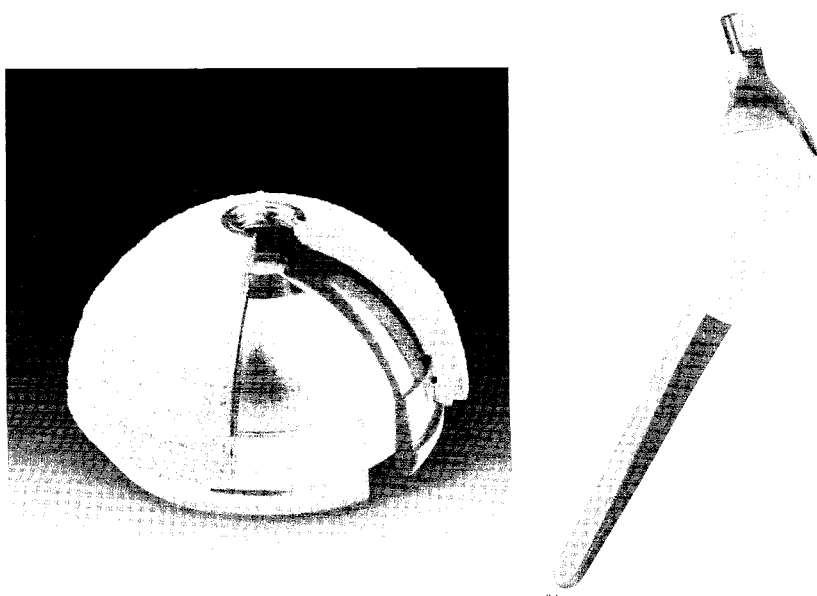
Recubrimiento maquinado. Eje listo para volver a prestar servicio.

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.

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.



En las Figuras anteriores se muestra una concha acetabular (izquierda) y una prótesis de cadera (derecha) cuyos sustratos están hechos con Ti-6Al-4V recubiertos con titanio de pureza comercial (CP-Ti) rociado mediante arco eléctrico protegido con argón.

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. Estos 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 térmica poliméricos exhiben propiedades iguales o mejores que sus contrapartes hechas 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

viniletileno y el nylon, son los que ofrecen mayor facilidad para ser empleados como recubrimientos por proyección térmica.

1.7 MATERIALES PARA PROYECCIÓN TÉRMICA [6]

Tres tipos de depósitos básicos pueden ser proyectados con esta técnica:

- Materiales de fase-simple, como metales, aleaciones, intermetálicos, cerámicos y polímeros.
- Materiales compuestos, como los cermets (WC/Co , $Cr_3C_2/NiCr$, $NiCrAlY/Al_2O_3$, etc.), materiales reforzados y polímeros reforzados.
- Materiales de capas o niveles, refiriéndose al gradiente de funcionalidad (FGMs).

Ejemplos de estos, conforme a sus ventajas y aplicaciones particulares, se describen a continuación.

1.7.1 MATERIALES DE FASE SIMPLE [6]

Metales. La mayoría de los metales puros y aleaciones de metales han sido proyectados térmicamente, incluyendo tungsteno, molibdeno, niobio, superaleaciones, zinc, aluminio, bronce, acero dulce e inoxidable, aleaciones de NiCr, estelitas base-cobalto, trialeaciones base-cobalto/niquel, y aleaciones autofundentes NiCrBSi.

Las aleaciones proyectadas tienen ventajas debido a su similitud con muchos metales base que requieren reparación, sus altos esfuerzos, y a su resistencia a las corrosión, desgaste y/o oxidación.

Las aplicaciones incluyen recubrimientos de pistones automotrices diesel y a gasolina, anillos de pistones o válvulas; aspas, cuchillas y cámaras de combustión de turbinas y motores; protección de puentes y otras infraestructuras propensas a corrosión; bombas y válvulas petroquímicas; y equipo de minería y agrícola.

Cerámicos. La mayoría de los cerámicos pueden ser proyectados térmicamente, incluyendo óxidos metálicos como Al_2O_3 , ZrO_2 estabilizada, TiO_2 , Cr_2O_3 , y MgO ; carburos como Cr_3C_2 , TiC , Mo_2C , y SiC (generalmente en la más dúctil matriz metálica de soporte como el cobalto o el NiCr); nitruros como el TiN y Si_3N_4 ; y espinelas (óxido de magnesio MgO más alúmina) o perovskitas como la mullita y el tipo 1-2-3 de óxidos superconductores, y cerámicos bioactivos como la hidroxiapatita (HA , $10Ca \cdot 4[OH] \cdot 6[PO_4]$).

Los depósitos proyectados de esos materiales son usados para proveer resistencia al desgaste (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , Cr_3C_2 , TiC , Mo_2C , y TiN), protección térmica (Al_2O_3 , ZrO_2 , y MgO), aislamiento eléctrico (Al_2O_3 , TiO_2 , y MgO), y resistencia a la corrosión. Los cerámicos son usualmente aplicados con proyección por plasma debido a las altas temperaturas de sus chorros.

Los intermetálicos como $TiAl$, Ti_3Al , Ni_3Al , $NiAl$ y $MoSi_2$ han sido todos proyectados térmicamente. La mayoría de los intermetálicos son muy reactivos a altas temperaturas y

son muy sensibles a la oxidación; de aquí que, atmósferas inertes deben ser usadas durante la proyección por plasma.

Las investigaciones han sido conducidas hacia la proyección térmica de formado/consolidación de depósitos intermetálicos.

Los polímeros pueden ser proyectados térmicamente de manera exitosa, éstos se encuentran disponibles en una forma particular. La proyección térmica de los polímeros ha sido practicada comercialmente desde la década de los 80s, y el creciente número de polímeros termoplásticos y termofijos y los copolímeros han sido proyectados, incluyendo uretanos, nylon 11, politetrafluoretileno (PTFE), etileno tetrafluoretileno (ETFE), polietercetonas, polimetilmetacrilato (PMMA), poliamida, policarbonato y copolímeros como Surlyn (DuPont), fluoruro de polivinilideno. La proyección por flama convencional y el HVOF son los métodos de proyección por flama más ampliamente aplicables para polímeros.

1.7.2 MATERIALES COMPUESTOS Y CERMET [6]

Particularmente, fibras, y compuestos con fibras reforzadas han sido todas producidas y usadas en varias aplicaciones. Particularmente -uso reforzado- recubrimientos resistentes de cermets como WC/Co, Cr₃C₂/NiCr, y TiC/NiCr son los más comúnmente aplicados y constituyen una de las más grandes áreas de aplicación de proyección térmica; los recubrimientos de cermet son discutidos ligeramente a lo largo de este texto.

Los materiales para la proyección térmica pueden tener fase reforzada, los contenidos van desde el 10 al 90% en volumen, donde la matriz de metal dúctil actúa como aglutinante, soportando la fase quebradiza reforzada.

1.7.3 MATERIALES DE GRADIENTE FUNCIONAL [6]

Desarrollado alrededor de los años 70s, FGMs son una creciente área de aplicación con promesas significativas para la futura producción de (a) materiales innovadores y dispositivos para usarse en aplicaciones referentes a grandes gradientes térmicos, (b) recubrimientos de materiales a bajo costo para lograr combinaciones de resistencia a la corrosión y resistencia mecánica o al desgaste, y (c) implementar material electrónico para la estructura de baterías, celdas de combustible, y dispositivos de conversión de energía termoeléctrica. La más inmediata aplicación del FMGs es el recubrimiento de barrera térmica (TBCs), donde los grandes esfuerzos térmicos son minimizados.

Componentes de por vida son desarrollados mediante la confección de los coeficientes de expansión térmica, conductividad térmica y resistencia a la oxidación. Esos FGMs están encontrando su uso en componentes de turbinas, toberas de cohetes, tubos de reactores químicos, boquillas de hornos incineradores y otros componentes de funcionamiento crítico.

Otros FGMs han sido desarrollados para:

- Protección térmica de materiales aislantes de polímeros livianos en componentes aéreos.
- Producción de baterías avanzadas metálico/óxido/intermetálico y celdas de combustible de óxido sólido.
- Producción de sistemas electrolíticos óxido/metal/electrodo tipo aéreo.
- Elaboración de barreras compuestas de pistola.
- Componentes de implantes biomédicos para incrementar el acoplamiento hueso-tejido.
- Sellos cerámicos aéreos exteriores en turbinas de gas de aeronaves y otros recubrimientos en maquinaria rotatoria.
- Multicapas gruesas TBCs para pistones de motores diesel de uso pesado.
- Recubrimientos dieléctricos de alto desempeño para componentes electrónicos.
- Recubrimientos con resistencia al desgaste para anillos de pistones en motores diesel.
- Recubrimientos óxido-resistentes para altas condiciones de temperatura.

El futuro crecimiento de las aplicaciones de los FGM asegurará que los procesos de proyección térmica, particularmente HVOF y proyección por plasma, se incrementen y se desarrollen; provistos de propiedades de materiales controlables y de costos de procesamiento optimizado.

1.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVOS [11]

Las características más importantes de los polvos que los hacen utilizables para la alimentación y proyección son las siguientes:

- Tamaño de partícula
- Distribución del tamaño de partícula
- Morfología
- Método de manufactura
- Densidad aparente
- Contenido de humedad

1.8.1 TAMAÑO DE PARTÍCULA [20]

Esta comúnmente definido por el límite superior e inferior de la distribución del tamaño de partícula. Debe entenderse que esos límites son establecidos normalmente por el percentil 90 y 10 de distribución respectivamente. Por ejemplo un polvo para proyección por plasma se define por -10 a $+44\mu\text{m}$, esto quiere decir que el 80% de las partículas tendrán un tamaño entre 10 y $44\mu\text{m}$, 10% estarán por debajo de $10\mu\text{m}$ y 10% estarán por encima de $44\mu\text{m}$. En la siguiente tabla se muestra el número de malla correspondiente al tamaño de la malla en micras.

No. de malla	Tamaño de malla, μm
100	149
120	125
140	105
170	88
200	74
230	62
270	53

1.8.2 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA [20]

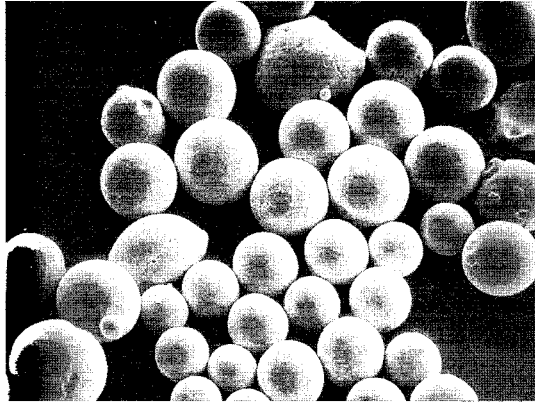
Por razones de economía los manufactureros usan tamices para clasificar los polvos y estos producen bordes mas puntiagudos que la clasificación por aire. La clasificación por aire es usada para límites por debajo de $44\mu\text{m}$ (malla 325) por que tamices inferiores a ese tamaño son poco prácticos.

Las diferencias en los tamaños de los polvos de un lote con respecto a los de otro pueden afectar las propiedades del recubrimiento. Si el tamaño de partícula cambia, se modificara la trayectoria de los polvos a través del chorro además del perfil de tiempo y temperatura.

1.8.3 MORFOLOGÍA DE LOS POLVOS [20]

La forma de los polvos está ligada al método de manufactura utilizado para su fabricación. La morfología afecta la alimentación de los polvos, la densidad aparente, la facilidad de proyección, contenido de partículas no fundidas en el recubrimiento, porosidad y vaporización.

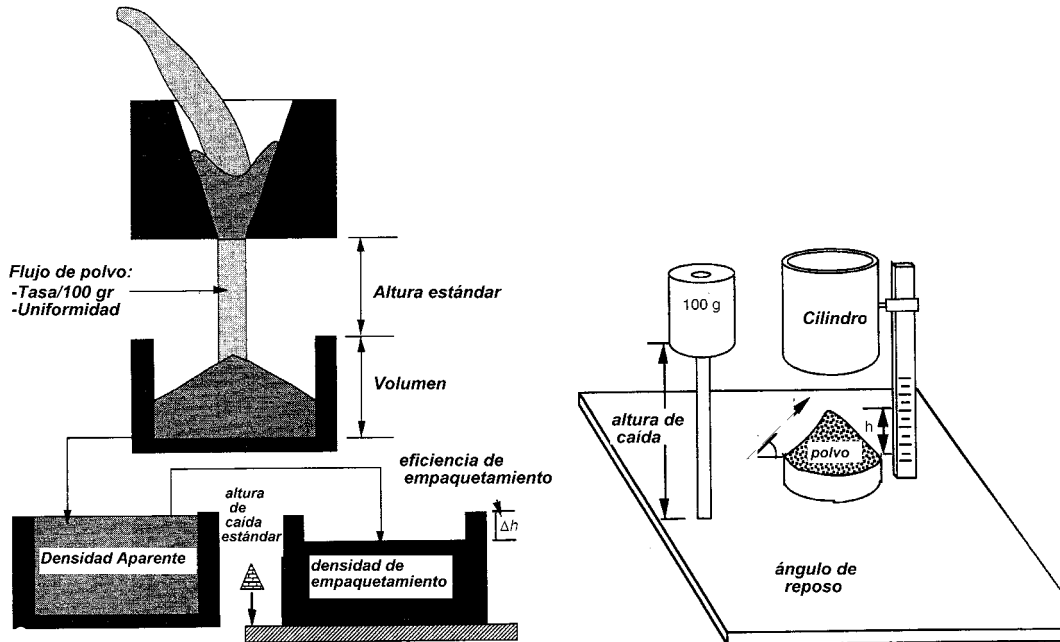
Las partículas elaboradas por atomización por agua poseen una forma irregular que no permite una correcta alimentación como con las partículas esféricas que se pueden empacar mas fácilmente dado la baja relación área-volumen que poseen, además que las partículas irregulares pueden adsorber una cantidad mayor de humedad superficial. Los polvos elaborados por atomización por gas son usualmente más esféricos y de tamaño de partícula menor por lo que fluyen mejor. La siguiente figura muestra uno de los dos procesos anteriormente mencionados, se muestran las características de los polvos elaborados por atomización de gas.



1.8.4 DENSIDAD Y FLUIDEZ [20]

La densidad es usada para definir la ausencia de porosidad, la gravedad específica de un material ó la densidad aparente de un polvo. La densidad aparente es la gravedad específica de un polvo, lo cual incluye todos los espacios entre las partículas. La densidad aparente está relacionada a la densidad de empaquetamiento del polvo. Por ejemplo, el acero puede tener una densidad de 7.8g/cm^3 y en estado de polvo puede tener una densidad de 3.1 a 4.7g/cm^3 por el bajo empaquetamiento de las partículas. La densidad aparente afecta dos importantes factores en la proyección: el flujo de alimentación y la trayectoria de las partículas. El flujo de la alimentación es afectado también por la fluidez de los polvos. La fluidez puede ser medida rápidamente y sin costo mediante la prueba de flujo Hall, descrita en la norma ASTM B 213. Para realizar dicha prueba, se vierten 25 ml de la muestra de polvo en un cono normalizado (ver figura inferior izquierda) y se mide la fluidez del polvo que pasa por el orificio del cono como una función del tiempo, es decir, se toma el tiempo que tarda la muestra de polvo en fluir a través del orificio. Como hemos visto la fluidez se mide en segundos. Un valor bajo del flujo, por ejemplo menor a 30 seg. , indica que el polvo tiene buenas características de fluidez. Sin embargo, es bien sabido que los polvos con pobre fluidez de Hall pueden ser alimentados confiablemente en los equipos de proyección térmica; Por lo tanto, esta propiedad debe ser tratada con precaución.

Una forma adicional de medir la fluidez de un polvo se muestra en la figura inferior derecha, la cual consiste en medir el ángulo de reposo o la pendiente de un montículo de polvo que se forma mediante el flujo de una masa específica de polvo desde un recipiente con un orificio en el fondo colocado a una altura también específica. Valores bajos de ángulo de reposo o de pendiente representan una buena fluidez del polvo.



1.8.5 CONTENIDO DE HUMEDAD [20]

Los materiales susceptibles de convertirse en polvo poseen una superficie específica y pueden retener una apreciable cantidad de humedad superficial. Algunos materiales son higroscópicos (absorbentes de agua) y pueden retener mas agua. Para aliviar este problema se recomienda que los polvos sean situados en un calentador alrededor de 100°C, según el material y tamaño de partícula, por lo menos 8 horas antes de que sean proyectados. En los casos en los que el polvo sea de material plástico usualmente se calientan a 50°C.

1.8.6 PULSOS EN LA ALIMENTACIÓN DE POLVOS [11]

Las pulsaciones en la alimentación de los polvos pueden causar un recubrimiento no uniforme en su espesor y microestructura. Dentro de las causas de estos pulsos pueden incluirse a: fugas de gas, distribución del tamaño de partícula, humedad, electricidad estática y diámetro de manguera reducido.

1.9 PRODUCCIÓN DE POLVOS METÁLICOS [3]

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a la forma de polvo. Hay tres métodos principales para producir comercialmente polvos metálicos, cada uno de los cuales implica consumo de energía para incrementar el área superficial del metal. Los métodos son:

1. Atomización:

- Por gas
 - Por agua
 - Por plato centrifugo
2. Químicos:
- Por reducción
 - Por descomposición
 - Precipitación de sales de elementos metálicos
3. Electrolíticos:
- Por pulverización del ánodo
4. Mecánicos: (para polvos cerámicos)
- Por trituración
 - Por molienda

1.10 TÉCNICAS QUÍMICAS PARA POLVOS CERÁMICOS [19]

La siguiente lista muestra los métodos químicos más importantes de preparación de polvos:

- El proceso sol-gel
- Spray drying y spray roasting
- Freeze drying
- Aglomeración y sinterizado

1.11 RELACIÓN ENTRE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS POLVOS Y LAS PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS [20]

Las especificaciones de los polvos (su morfología, su método de manufactura, su tamaño y distribución, su fluidez, densidad y su composición) repercuten de manera crítica en las propiedades de los recubrimientos obtenidos. Por lo tanto se debe poner mucha atención a dichas especificaciones de manera que se eviten problemas durante el procesamiento de los recubrimientos tales como una baja eficiencia de deposición (es la relación entre el peso del material depositado y el peso del material rociado), un flujo alto de gases de arrastre debido a la baja fluidez del polvo produce un calentamiento pobre de este ocasionando la obtención de una mala calidad en el recubrimiento.

La tabla siguiente ilustra lo anterior mostrando la relación entre las variaciones en composición, método de manufactura y densidad aparente de polvos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ con la eficiencia de deposición, la rugosidad y la dureza obtenidas. Se empleo el mismo equipo de proyección por plasma [20].

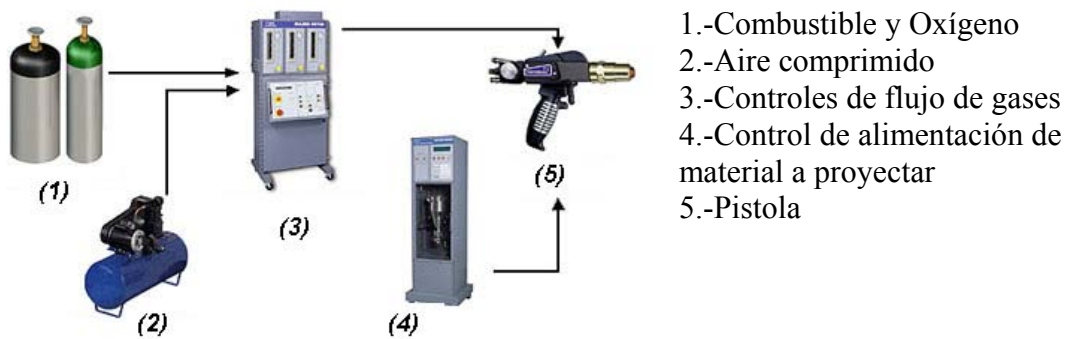
Material	Composición	Proceso de manufactura	Densidad aparente, gr/cm ³	Rugosidad Ra, μm	Dureza HV _{0.2}	Eficiencia de deposición, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	97/3	Por Fusión	1.7	3.22	1069	61
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	87/13	Mezclado	1.8	3.15	949	74
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	87/13	Aglomerado y sinterizado	1.5	3.56	934	78
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	87/13	Aglomerado	1.1	3.09	1012	71
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	70/30	Aglomerado y sinterizado	1.4	3.9	887	75
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	60/40	Mezclado	1.8	3.43	813	71
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	60/40	Aglomerado y sinterizado	1.0	2.7	702	77
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	60/40	Aglomerado y sinterizado	1.4	4.33	762	65
Al ₂ O ₃ -TiO ₂	30/70	Aglomerado y sinterizado	1.4	3.77	704	68

CAPITULO 2. PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA

2.1 PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA [9]

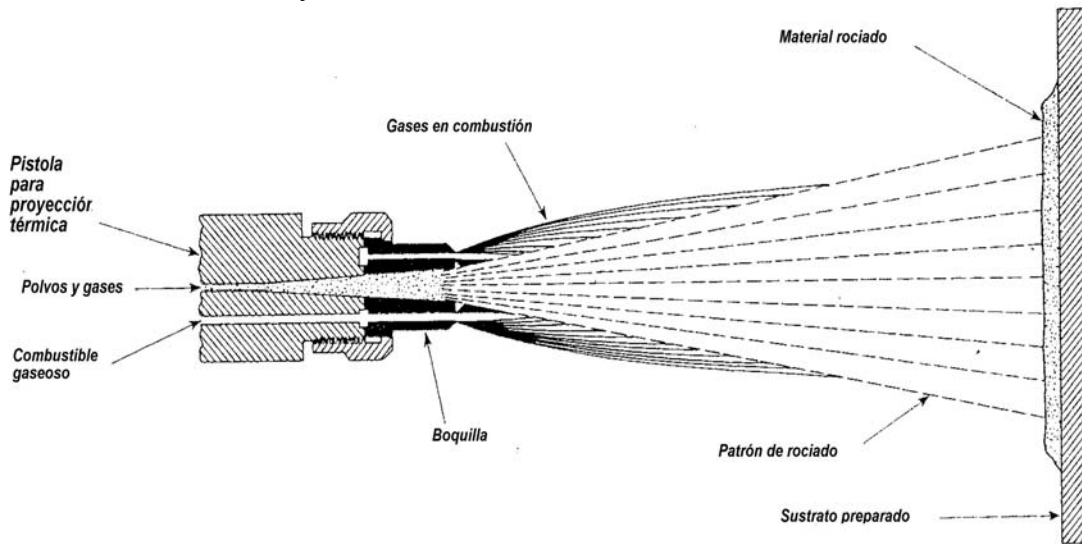
2.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.

La proyección térmica por flama convencional fue el primer proceso de proyección térmica desarrollado (aprox. en 1910) y es aún 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 con oxígeno para generar altas temperaturas de combustión. En la siguiente figura se muestra la instalación del proceso mencionado.

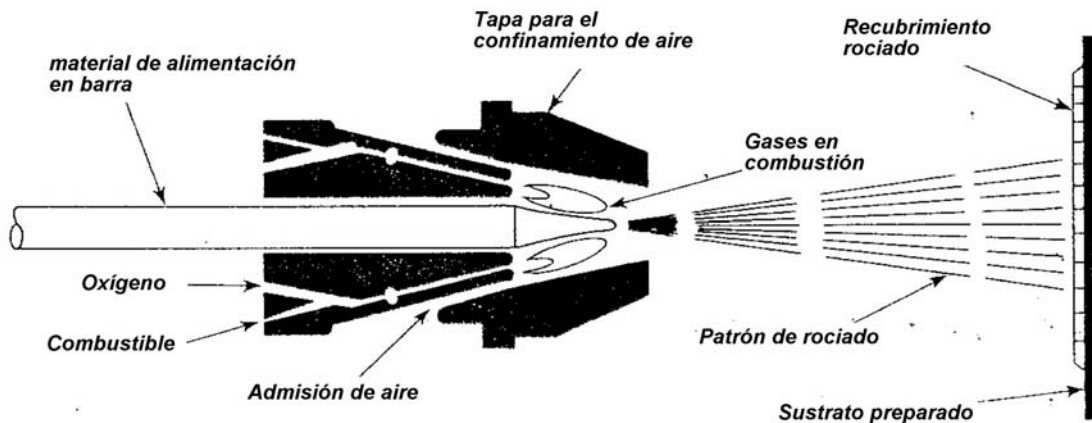


En las pistolas convencionales, un chorro de combustible y oxígeno hace combustión exteriormente al extremo frontal de la boquilla de la pistola. Las pistolas consisten en un arreglo de secciones de distribución de gases a través de la boquilla y orificios de mezclado de gases al final de dicha boquilla. 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 o el alambre. Dicha barra o alambre es alimentada

mecánicamente al sistema. Metales y los óxidos sirven para elaborar dichas barras o alambres. La figura anterior también ilustra este diseño. Una gran ventaja de los alambres y las barras sobre los polvos consiste en que el grado de derretimiento del material es significativamente mayor, lo cual produce recubrimientos más densos. Adicionalmente, el aire atomizador produce gotas más finas, lo cual repercute en la obtención de recubrimientos más finos y lisos.



La figura anterior muestra un sistema alimentado con polvos (powder flame spray).



La figura anterior muestra un sistema alimentado con barra o alambre (wire flame spray). 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 gases 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 metales, 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 del 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

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 tasa de alimentación se fija mediante una válvula con la cual se introduce el polvo en 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 éstos. 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.

2.1.3 COMPONENTES

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

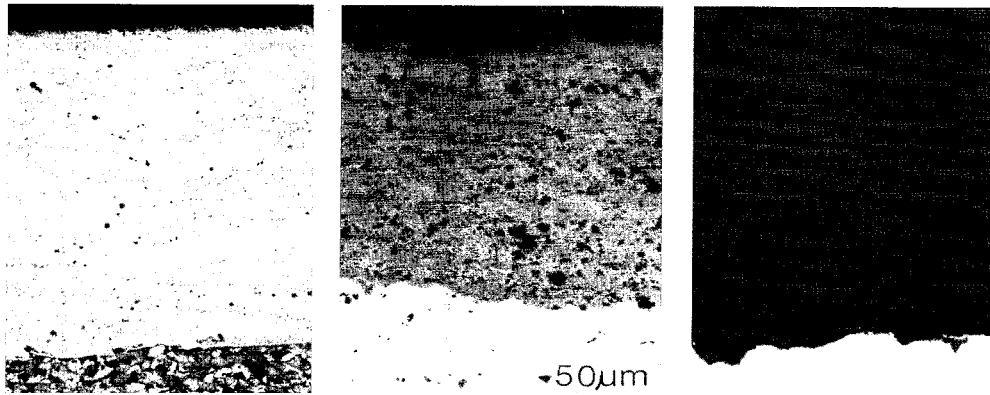
- Tanques de gases.
- Suministro de aire mediante compresor.
- Mangueras para los gases.
- Reguladores para el oxígeno, el aire y el combustible.
- Rotómetros para el control del flujo de gases.
- Válvulas de no retorno en los reguladores y en la pistola.
- La pistola de proyección térmica compuesta 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.

2.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA [9].

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 siguiente 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 en relación a otros procesos de proyección térmica.

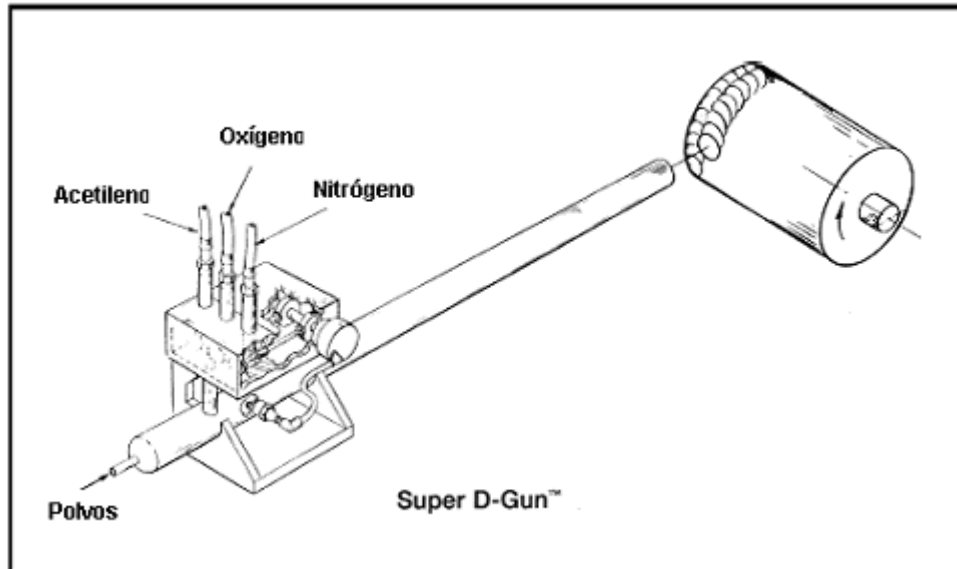
Las inclusiones de óxido son resultado del carácter oxidante de los procesos de proyección térmica, los cuales permiten un alto grado de interacción entre la atmósfera y las gotas del material fundido. La estructura del recubrimiento polimérico muestra una densa y bien adherida capa superficial. Esta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



2.2 PROCESOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR DETONACIÓN.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO Y EQUIPO [9].

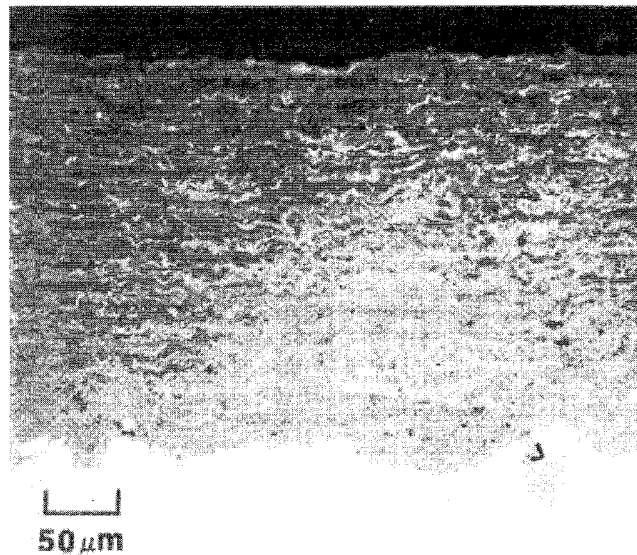
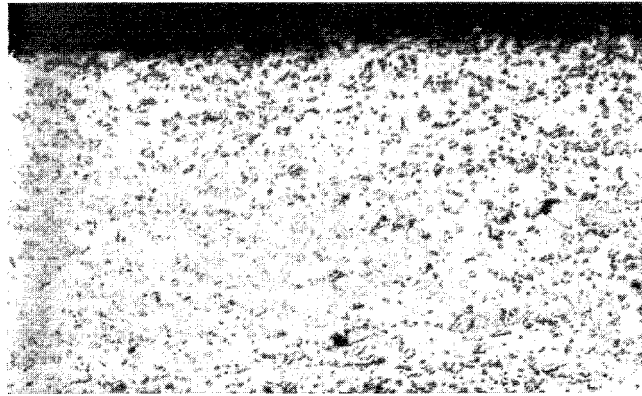
La D-Gun® genera un chorro con alta energía térmica y cinética mediante la confinación de la detonación de la combustión en una cámara en la cual los polvos son introducidos. Este diseño produce una gran transferencia de calor y momentum a las partículas de polvos. La D-Gun® (Desarrollada por Union Carbide, hoy Praxair Surface technologies, Inc. Indianápolis, IN) fue el primero y más extensamente conocido proceso de proyección térmica por detonación. Sin embargo, hoy en día se estudian otros métodos de proyección térmica por detonación, los cuales están en vías de estar disponibles comercialmente. La figura siguiente es un esquema de una D-Gun®



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 a 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. El ciclo de purga, inyección y detonación se repite a una frecuencia de 3 a 6 Hz.

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 la 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.

2.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO OBTENIDO POR ESTE PROCESO [9].



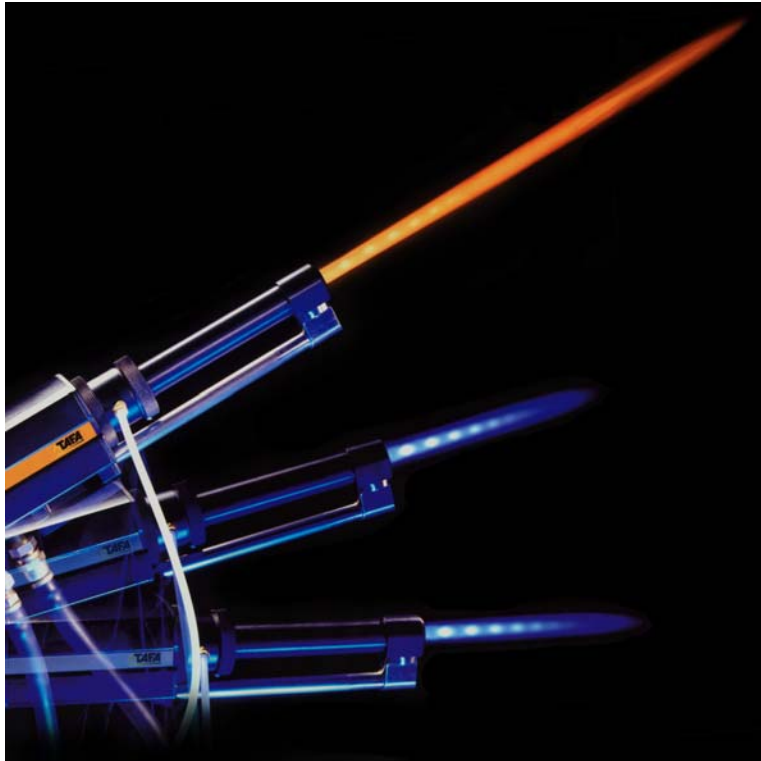
La figura anterior muestra la microestructura típica de un recubrimiento de WC/Co (cermet y óxido) producido por una D-Gun®. Nótese que los splats obtenidos son más finos y alargados que los producidos por los procesos convencionales de proyección térmica por flama. Se nota también una presencia menor 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 protector previene a las partículas propelidas 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.

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 1950's. 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 usados en motores de aviones comerciales se especifican para proceso con la D-Gun®.

2.3 PROYECCIÓN TÉRMICA POR COMBUSTIÓN DE ALTA VELOCIDAD (HIGH-VELOCITY OXYFUEL SPRAY “HVOF”) [9]



2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO [9]

El proceso HVOF fue inventado en 1958 por Union Carbide (hoy en día Praxair Surface Technologies, Inc.) pero se volvió comercialmente significativo hasta los inicios de los 1980's cuando el sistema JetKote (Deloro Stellite, Goshen, IN) fue introducido por James Browning. El HVOF es similar en algunos aspectos a la proyección por detonación. La figura anterior muestra la flama producida por la pistola de alta velocidad. 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®.

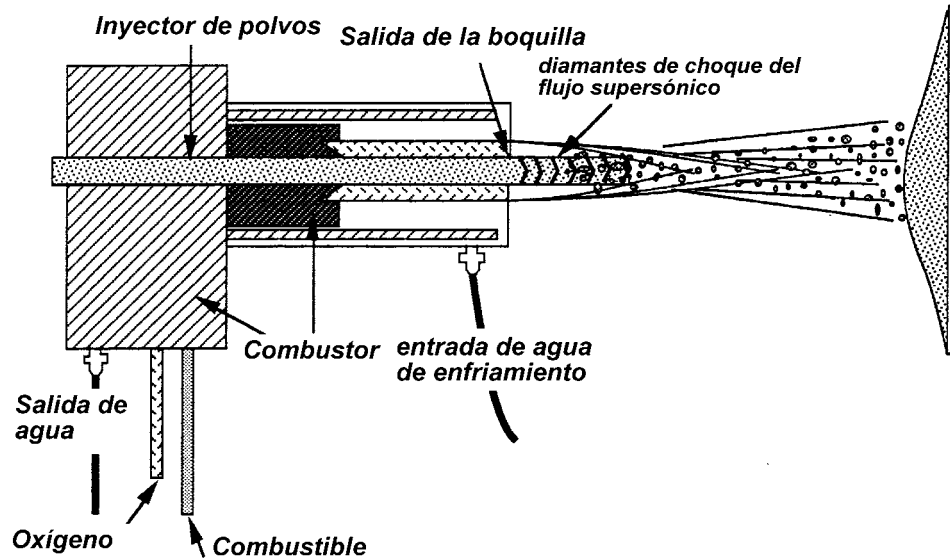
En principio, un alto volumen de gases combustibles son alimentados al interior de cámara de combustión, en la cual se extienden de 8 a 30 cm (3 a 12 pulgadas) a lo largo del cañón del dispositivo a través del cual los gases en combustión abandonan el

dispositivo. 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 con marca registrada como el MAPP® (Metilacetileno-Propadieno estabilizado), el Apache® y el Crylene®.

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 la 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 ~ 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 encausa 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 siguiente 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.

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 PT por 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 $\text{Cr}_2\text{C}_3/\text{NiCr}$. 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 de turbinas para aviación mediante procesos HVOF con keroseno como combustible.

2.3.2 EQUIPO Y COMPONENTES [9]

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 los 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 dispositivos de seguridad.

La siguiente figura muestra un sistema de HVOF tradicional.



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 al interior de la pistola. Los materiales de la cámara de combustión necesitan ser resistentes a la oxidación, particularmente en los dispositivos alimentados con keroseno. Las boquillas están hechas normalmente de cobre o aleaciones de cobre de alta conductividad térmica libre de oxígeno (OFHC: Oxygen-Free High Conductivity).

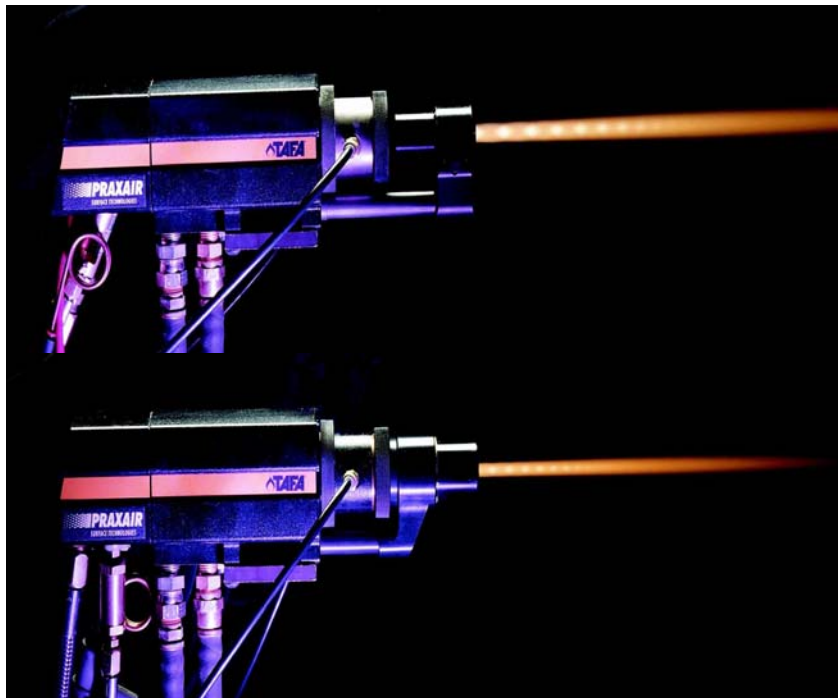
Debido a la alta entalpía y velocidad del chorro, las boquillas están pulidas internamente para evitar la acumulación de polvo fundido. Los circuitos de enfriamiento por agua están diseñados para minimizar las caídas de presión, lo cual puede repercutir en una súbita evaporación del agua de enfriamiento. La evaporación reduce la transferencia de calor hacia el agua líquida, repercutiendo en la oxidación de los componentes de la pistola, lo cual reduce también la transferencia de calor. Una reducción en la transferencia de calor contribuye también al derretimiento de la boquilla. El control del gasto de alimentación de polvos en una pistola HVOF es un factor crítico, incluso mayor que en los procesos de proyección convencionales por flama. Esto se debe primordialmente al hecho de que los

dispositivos HVOF son más susceptibles a los volúmenes de polvo inyectados. En diseño de alta velocidad (presión relativamente baja), el gasto de alimentación de polvos se limita a aproximadamente de 6 a 9 cm³ / min.

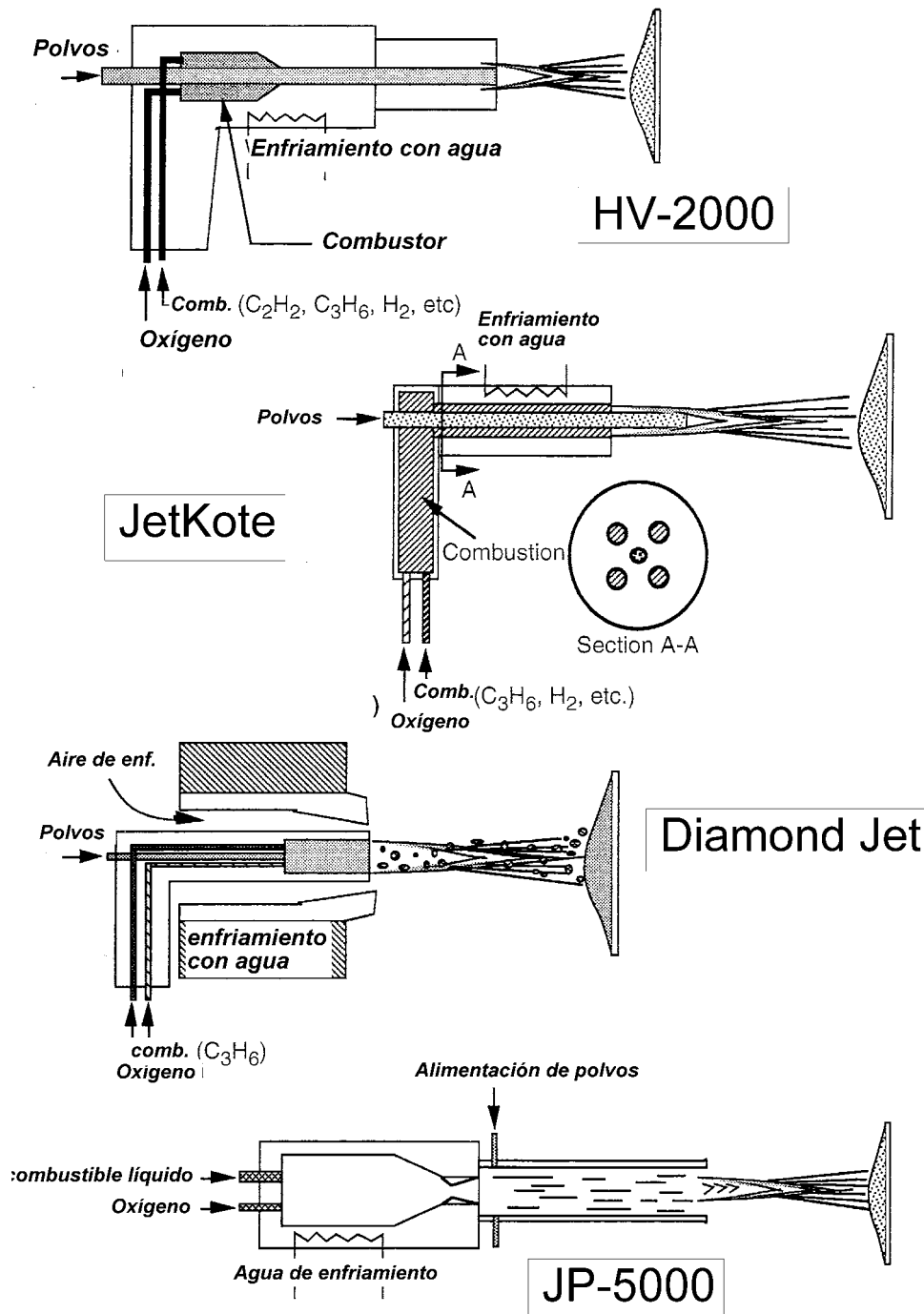
Las pistolas de HVOF se clasifican en 4 diseños principales:

- Con cámara de combustión y boquilla alineadas axialmente, en las que el gas se suministra a través de un dispositivo mezclador al interior de la cámara de combustión. El gas de arrastre con los polvos se inyecta en la cámara de combustión mediante un puerto al centro de la cara del dispositivo mezclador.
- Con cámara de combustión que alimenta gases calientes mediante un conector en ángulo a la boquilla. El polvo se inyecta mediante un puerto en la parte posterior del conector, lo cual centra la corriente de polvos al interior de la boquilla.
- Una adaptación de una pistola convencional por flama, en la que la combustión puede o no estar confinada por una boquilla enfriada por agua en la que una corriente de polvos arrastrados por gas es inyectada.
- Sistemas de alta presión alimentados con keroseno, en los que se emplea una inyección de polvos radial a la salida del combustor.

La siguiente figura ilustra un par de diseños de pistolas para HVOF.



Las figuras siguientes ilustran estos cuatro tipos de diseños descritos, mostrando las mayores diferencias entre ellos. Cada diseño tiene sus ventajas y limitaciones propias. Todos ellos producen recubrimientos de WC/Co de alta calidad. El diseño axial mostrado en la figura superior es particularmente adecuado para proyectar materiales cerámicos y carburo de cromo. El resto de los diseños son más adecuados para la proyección de materiales metálicos.



Tal como se mencionó previamente, 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 sLm^N con flujos de oxígeno nominales de 283 sLm. Los gastos de flujo de hidrógeno van nominalmente de 660 a 850

^N sLm: litros estándar por minuto (standar liters per minute)

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 $4.2 \text{ m}^3 / \text{min}$. 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.

Las velocidades de los gases de salida son tan altas que en la mayoría de los procesos HVOF se hacen visibles los patrones de “choque” en forma de diamante en los chorros de gas, lo cual es característico de la naturaleza supersónica del chorro. Dichos patrones de choque son similares a los que aparecen en las toberas de las turbinas de avión que utilizan postquemadores. El número de los patrones de diamantes presentes, aunque se asocian con la velocidad del gas, no es una indicación adecuada del número de Mach (la velocidad del gas en relación con la velocidad del sonido). Estas velocidades tan altas en consecuencia generan altos niveles de ruido. Los niveles de ruido para los sistemas HVOF de baja presión son $\sim 125+$ dBA (típicos en los procesos de plasma de alta energía), mientras que los sistemas HVOF de alta presión (el más notable es el de las pistolas alimentadas con keroseno) operan a $133+$ dBA.

2.3.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO [9]

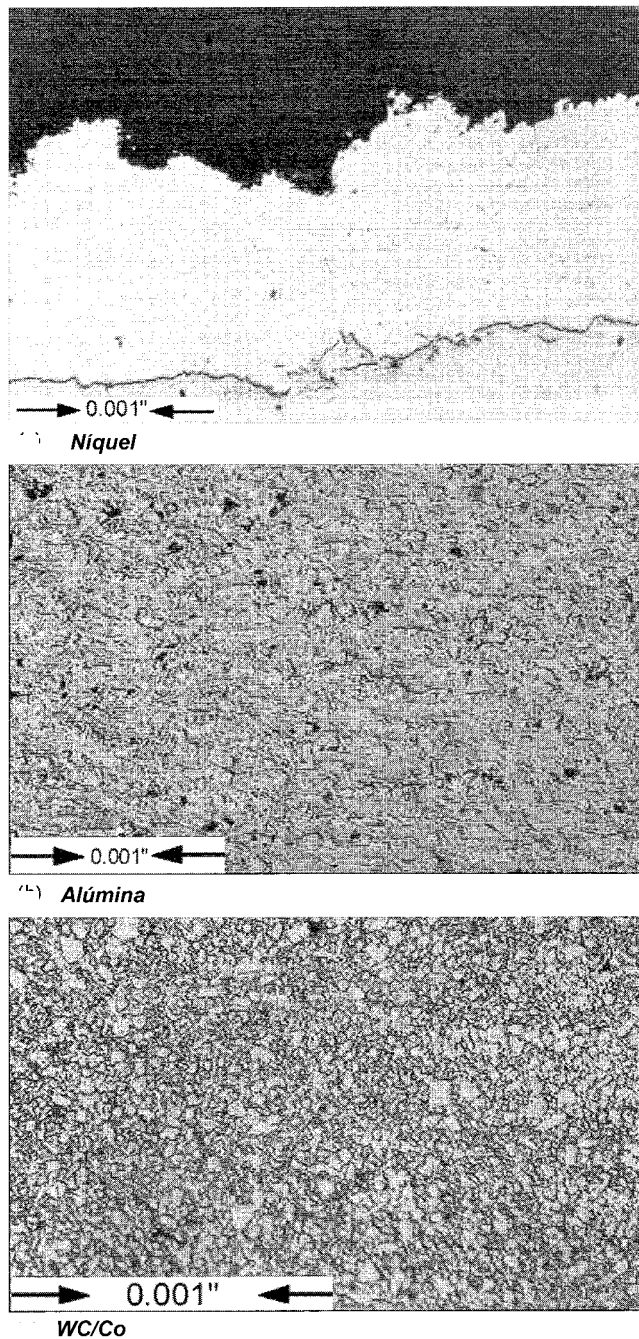
Las propiedades del recubrimiento resultante del HVOF fueron reportadas para ser comparadas con aquellas del recubrimiento de la D-Gun, particularmente para recubrimientos de carburos y óxidos. La densidad del recubrimiento proyectado por el HVOF, adhesión, y contenidos de oxido también se comparan favorablemente con la alta energía, de los recubrimientos proyectados por plasma. Los esfuerzos de adhesión 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 mas ó menos 83Mpa (alrededor de 12ksi).

La porosidad es típicamente reportada a menos de un 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_2C), preservando los altos valores intrínsecos de dureza del material.

Una de las características de los procesos de HVOF, particularmente en pistolas de alta presión y que usan keroseno como combustible, es algún control de los esfuerzos residuales. Los parámetros que generan altas presiones en la cámara de combustión tienen una fuerte tendencia a producir esfuerzos de compresión en los recubrimientos.

La eficiencia de deposición (ED) de las pistolas en HVOF que usan keroseno como combustible es mucho mas 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 partícula en el material de alimentación no forma parte del recubrimiento. Además, a partir de las microestructuras (observar las siguientes figuras) y las ED obtenidas, es posible que estas partículas grandes “granallen” al recubrimiento en formación (obviamente no se

adhieren, sólo “rebotan” en él) lo cual ayuda a generar esfuerzos residuales de compresión en el recubrimiento final.



Las 3 figuras anteriores muestran algunos ejemplos de las microestructuras típicas en los recubrimientos obtenidos mediante HVOF. De las figuras anteriores, la de arriba: níquel, centro: alúmina, abajo: WC/Co se caracterizan por la dispersión de finas partículas de óxidos y la formación de splats densos y finos. La tercera figura muestra una alta retención de carburos.

2.4 PROYECCIÓN POR ARCO ELÉCTRICO [9]



2.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO [9]

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 usan un arco eléctrico de corriente directa, cerrado entre dos electrodos de alambre consumibles 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. La figura anterior ilustra una pistola de arco eléctrico.

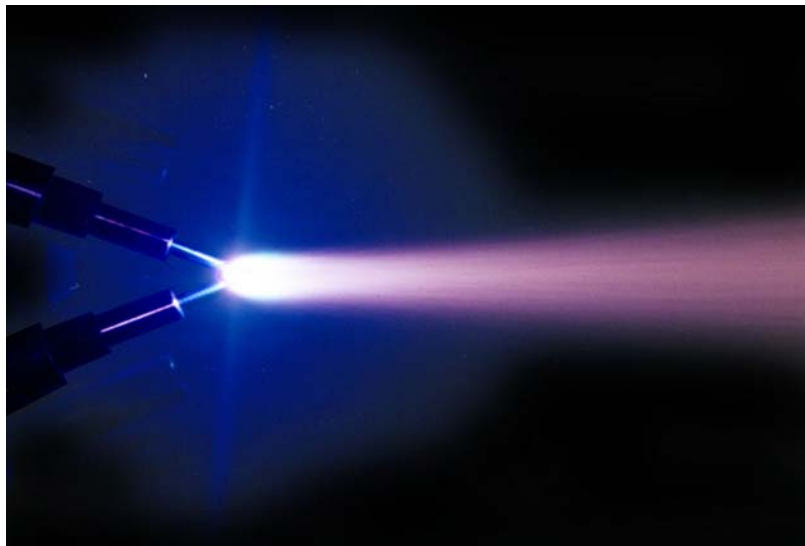
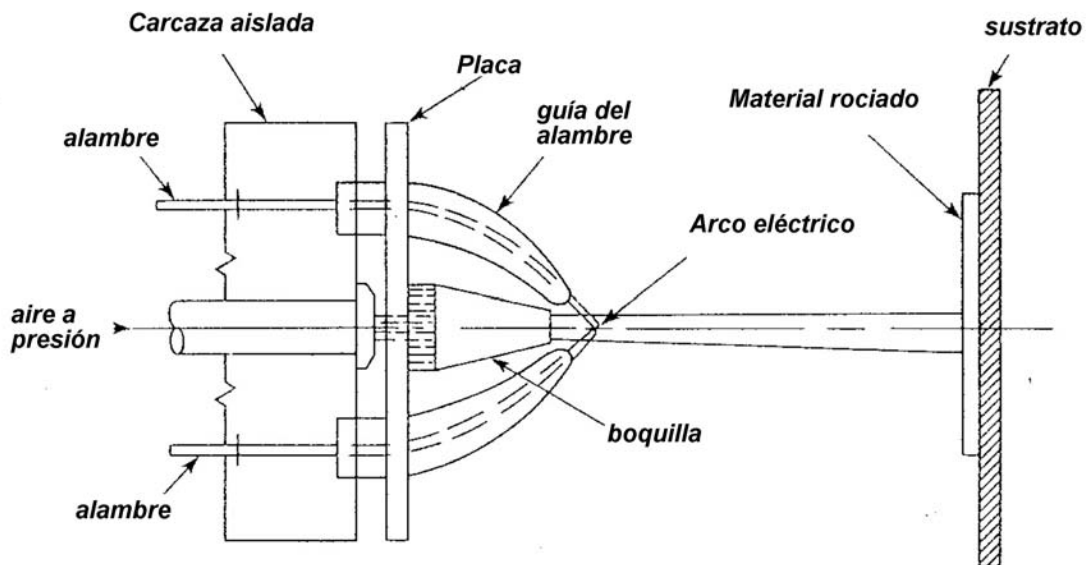
El proceso es mostrado esquemáticamente en la siguiente figura. Dado que los alambres son fundidos directamente por el arco, la eficiencia térmica de este proceso es considerablemente más alta que ningún otro proceso de proyección térmica. Un chorro de aire de alta velocidad localizado atrás de la intersección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

Los rangos de flujo de aire de alta velocidad están alrededor de 0.8 a $1.8\text{m}^3/\text{min}$. Conforme se forma el metal 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 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 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.

De las 2 figuras siguientes, la primera ilustra el continuo vapor de metal fundido que se desprende de la punta de los alambres que son rotos por los chorros de aire; la segunda muestra el arco formado en la punta de la pistola entre los dos electrodos de alambre.



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 un 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 incrementa 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 μm . 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 siguiente da algunas velocidades de alimentación típicos para alambres comunes de proyección.

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)

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. Esos 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.

El sistema de proyección por arco eléctrico típico consiste de lo siguiente:

- Voltaje constante, rectificador de dc/fuente de poder.
- Suministro de aire comprimido.
- Alimentador de alambre comprendido de un motor eléctrico ó neumático, ruedas guías y dispositivos tensores de ruedas guías.
- 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 ó 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 50 A dc; muy pocos diseños permiten operar por debajo de 25 A dc.

La rectitud del alambre está expresada en términos de la dirección e inclinación o hélice. Cuando el alambre se ha agrupado demasiado en cualquiera de las direcciones, el final del alambre rotará como saliéndose de las guías de los alambres. Esta rotación provoca que los alambres pierdan la intersección, causando una interrupción del arco, algunas veces llamado “salpicadura”. El movimiento de la pistola durante la proyección acentúa el problema de la rotación del alambre. El control de calidad verifica que para dirección y para inclinación los problemas son relativamente simples. Una longitud de 3 a 4m de alambre es cortada del carrete de alambre permitiendo la libre caída del mismo al piso o a la superficie de trabajo.

El alambre naturalmente se abrirá conforme alguna tensión sea liberada. El diámetro de la vuelta que forma el alambre es un indicador del esfuerzo residual al igual que la altura desde el piso al cabo suelto del alambre. Números aceptables para esas dimensiones tienen que ser determinadas empíricamente o ser obtenidos del proveedor. Los valores varían de acuerdo con el material, proceso de fabricación y número de recocidos.

Alineamiento y desgaste son dos de los más significantes problemas con las guías de los alambres. El desalineamiento o desgaste pueden causar que los alambres pierdan su intersección, causando la interrupción del arco y la salpicadura.

Un pobre control de tensión en el mecanismo de alimentación de alambre causa que uno ó ambos alambres deslicen en los rodillos guía, produciendo cortes de electricidad y salpicaduras. Algunos diseños de rodillos alimentadores han sido desarrollados para mejorar el agarre de la amplia variedad de materiales proyectados. Entre los muchos

diseños están los rodillos en V-acanalados/moleteados para alambres blandos y muy duros y los rodillos en U acanalados para alambres comunes.

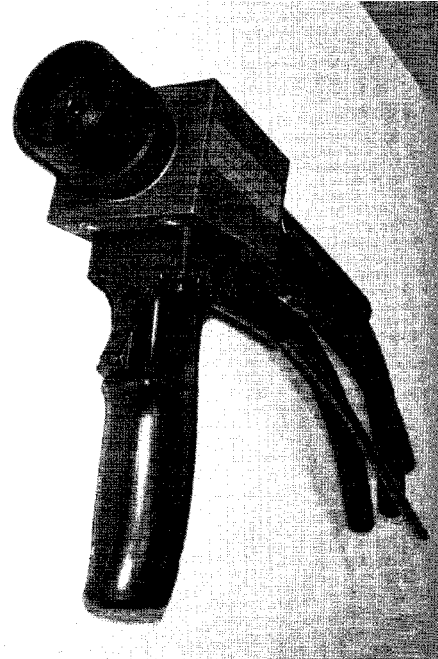
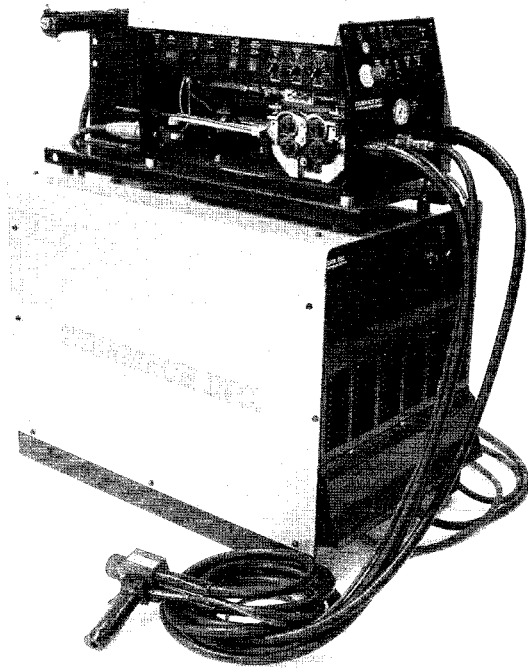
Las combinaciones de alimentadores de alambres incluyen diseños de alimentadores que únicamente jalan, únicamente empujan y una combinación de jala-empuja.

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 $1.8\text{m}^3/\text{min}$ (65scfm) y 690kPa (100psi). Aceite y humedad en el aire permite la oxidación del recubrimiento, contaminación del sustrato e inclusiones en el recubrimiento.

Los conductos de aire y las protecciones del arco están usualmente situados alrededor del frente de la pistola para proteger al operador de la línea directa de la vista de la luz de alta intensidad visible y de la luz ultravioleta. Los conductos de aire también proveen forma al chorro de aire para controlar la velocidad y proyectar un patrón del vapor de la partícula.

Los proveedores de energía utilizados para proyección por arco eléctrico son rectificadores modificados tipo fuentes de voltaje constante como las usadas en soldadura. Los rangos de operación típicos están de 15 a 400 A dc y de 50 a 250 V 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. Las 2 siguientes figuras ilustran el equipo indispensable del proceso de proyección por arco eléctrico.





2.4.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO [9]

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 de 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.

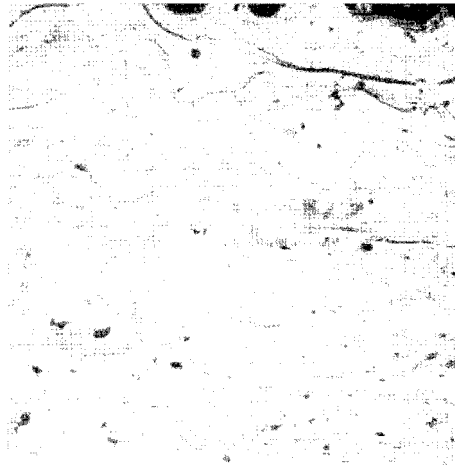
Las micro-estructuras de la proyección por arco eléctrico varía ampliamente según los parámetros de operación. El recubrimiento promedio por este proceso es caracterizado por salpicaduras que son más gruesas y variadas en tamaño que aquellas vistas en los recubrimientos por flama alimentados por alambre 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 micro-estructuras del proceso por arco eléctrico, pero en este caso, son partículas resolidificadas, eso es, partículas que se fundieron de los alambres y que resolidificaron antes del impacto.

Las micro-estructuras de la proyección por arco eléctrico pueden ser mejoradas por:

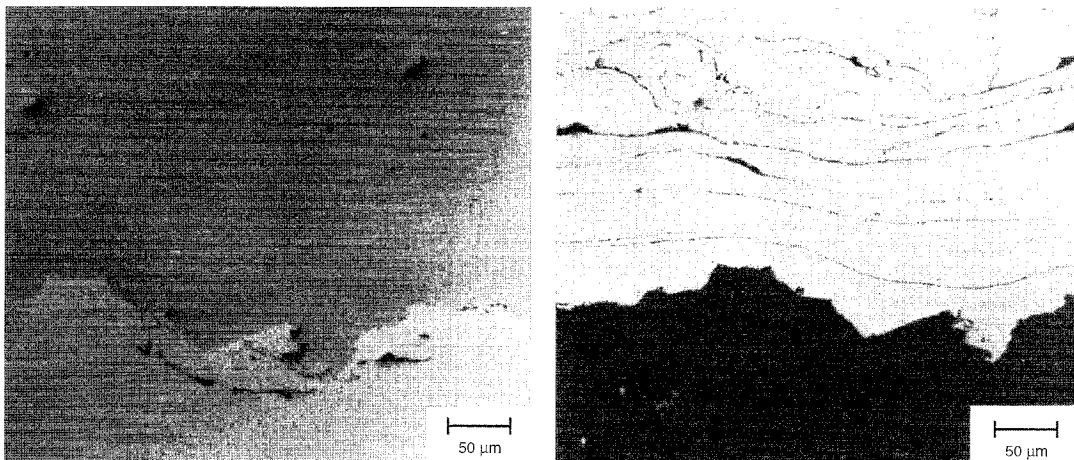
- Usando alambres de diámetro mas pequeño, depositados a flujos de alimentación más bajos (corriente).
- Usando conductos de aire de alta velocidad para reducir el tiempo de permanencia.

- Reduciendo la distancia de separación para reducir la oxidación.
- Reduciendo el voltaje del arco para minimizar el sobrecalentamiento de las gotitas de material fundido.

La siguiente figura ilustra 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 desarrollado; puesto que la proyección con gas inerte, en lugar de usar aire comprimido, sirve para reducir los el contenido de óxidos.

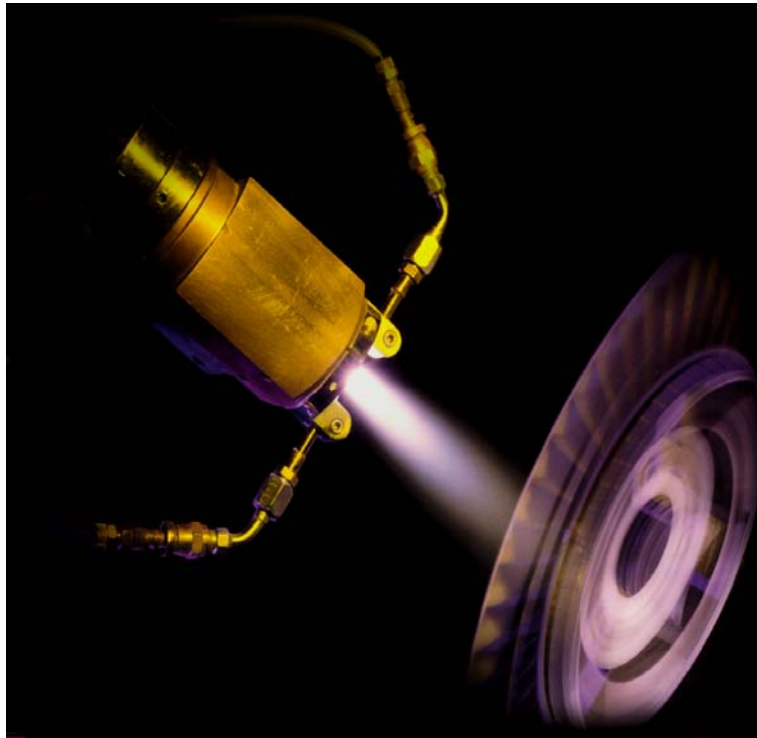


La siguiente figura representa algunas de las mejoras en la micro-estructura que han sido hechos utilizando proyección por arco eléctrico con gas inerte. Nótese que los depósitos de inclusiones de óxidos en los recubrimientos realizados en estas cámaras son virtualmente eliminados.



La proyección por arco eléctrico ocupa un lugar importante en la tecnología de proyección térmica y está situada particularmente en la deposición de alto porcentaje de deposición. Áreas específicas de interés para éste 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 [9]

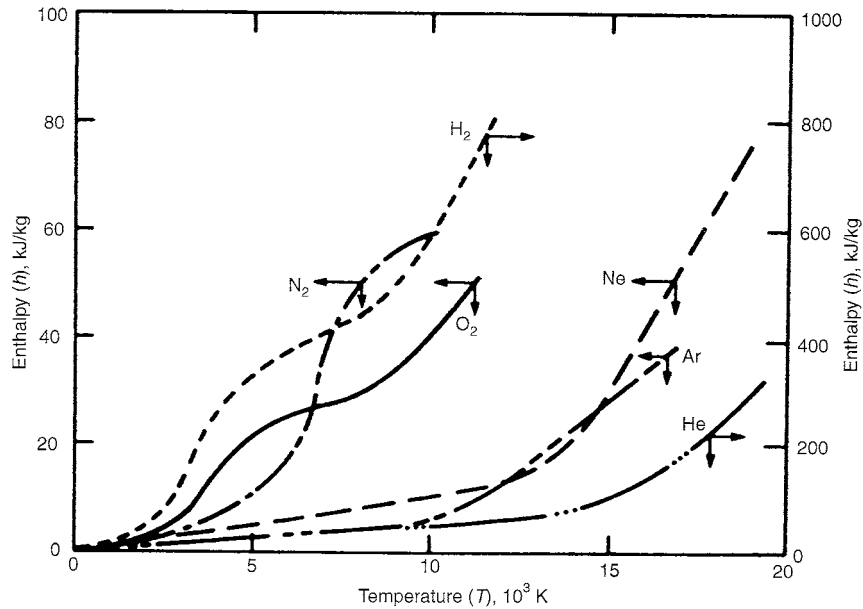


2.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO [9]

Plasma, a menudo llamado el cuarto estado de la materia, consiste normalmente de átomos neutros, iones positivos y electrones libres. La figura anterior muestra una pistola de proyección térmica por plasma. El plasma es producido por transferir de 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.

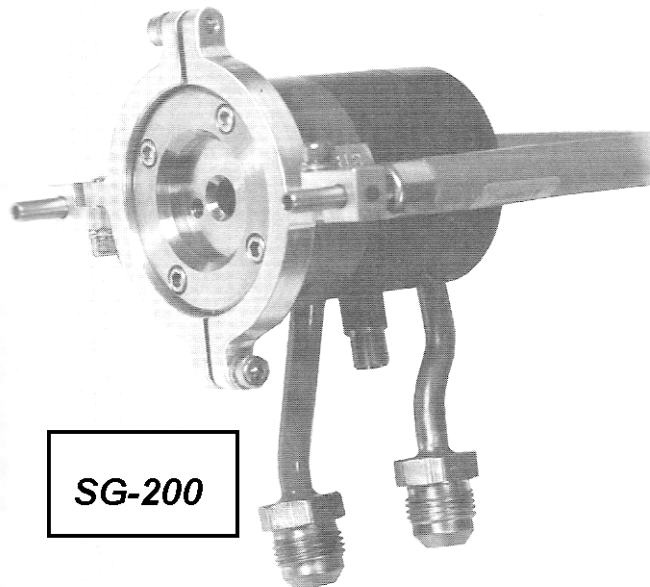
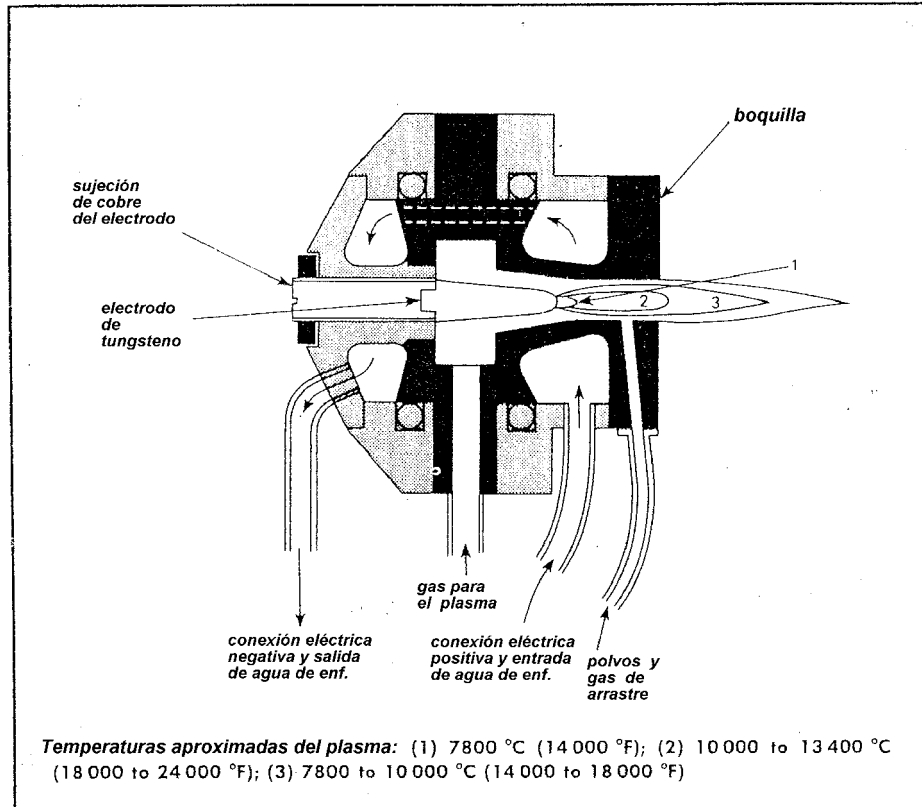
Una vez que la entrada de energía es removida, los electrones y los iones se recombinan, liberan energía calorífica y luminosa.

En un arco de plasma, el calentamiento del gas es suficiente para generar temperaturas en el centro del plasma que exceden los 20,000°C (36,000 °F), dependiendo de las propiedades del gas y de sus características de falla eléctrica. La siguiente figura grafica valores de la densidad de energía ó entalpía, de varios gases para proyección por plasma con respecto de la temperatura.



La entalpía del gas indica el potencial de calentamiento del mismo en estado de plasma. Nótese que gases di-atómicos como el hidrógeno y nitrógeno tienen mayores entalpías para una temperatura de excitación dada, lo cual se relaciona con la disociación de su estructura molecular, seguida por la ionización.

La proyección por arco de plasma de dc es el más flexible de los procesos de proyección térmica con respecto a los materiales que pueden ser proyectados, dados los gases inertes, alta velocidad de gases y extremas altas temperaturas. Los componentes básicos del diseño de una pistola de arco de plasma de dc se muestran a continuación en la primera de las 2 siguientes figuras.



La pistola por arco de plasma de dc, mostrada en la parte inferior de la figura anterior, combina un cátodo axialmente alineado (1 a 2% de tungsteno toriado) y un ánodo de boquilla (cobre OFHC). 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.

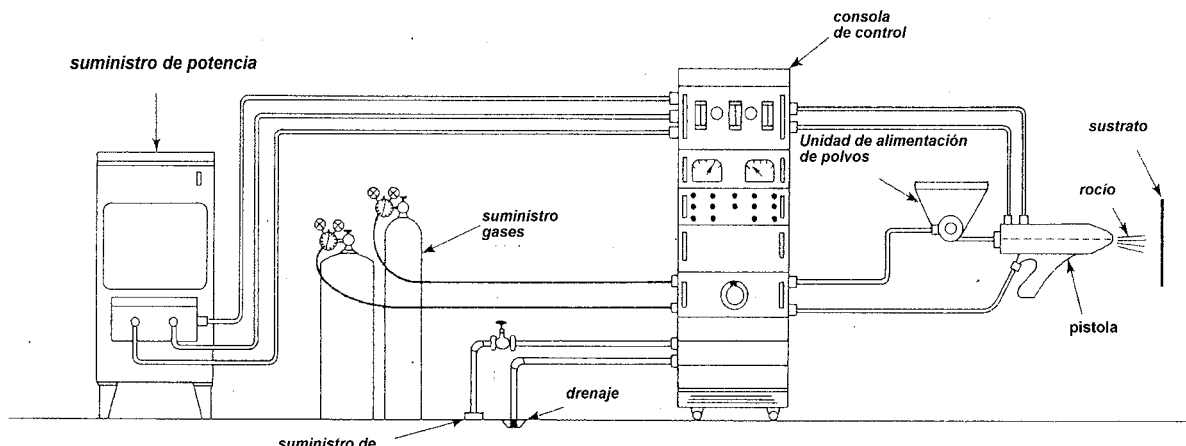
Los gases que forman el plasma son introducidos a través de la parte posterior de la pistola. Esos gases entran a la cámara del arco a través de un inyector de gas que proporciona un vórtice al gas. El vórtice estabiliza el arco en la punta del cátodo en la región de baja presión del vórtice y rota la 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.

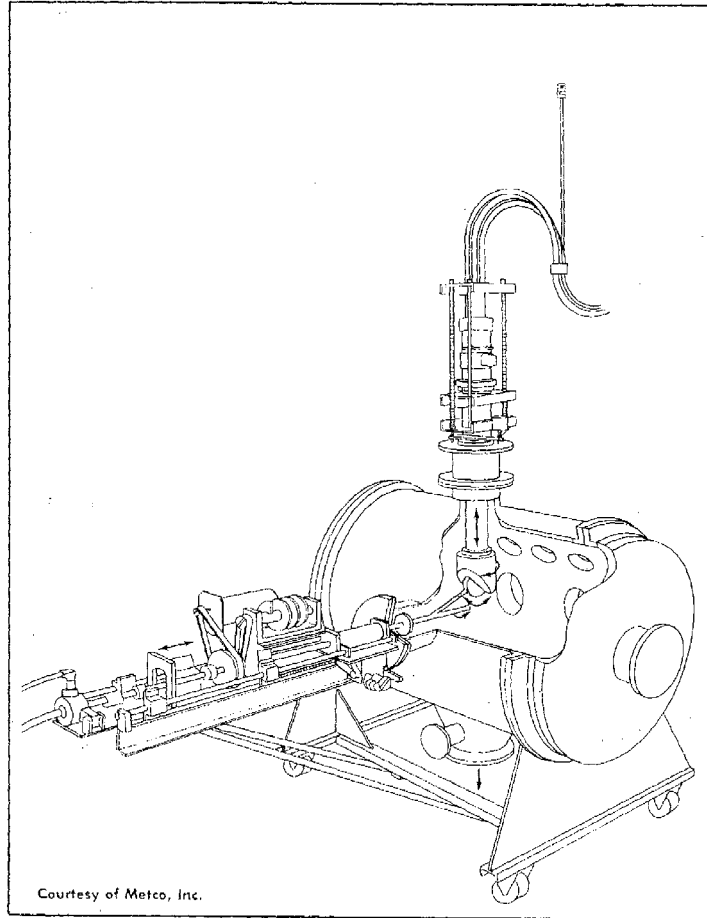
Los gases son calentados conforme pasan alrededor o a través del arco. Los gases calientes se expanden radial y axialmente, acelerando conforme estos se expanden y salen a través de la boquilla. Muchos diseños de pistolas son convergentes o divergentes para adquirir expansiones supersónicas, lo cual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

2.5.2 EQUIPO [9]

Los sistemas de proyección por arco de plasma ilustrados en la siguiente figura 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

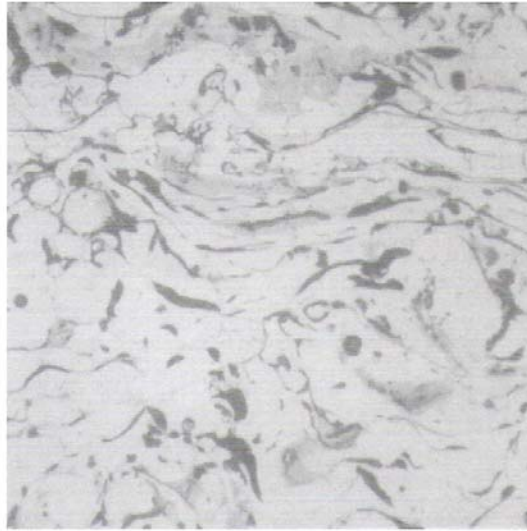




La figura anterior muestra una cámara para atmósfera inerte y/o baja presión. El cátodo es remplazado una vez por cada dos o cinco veces que se remplaza el ánodo dependiendo de la densidad de corriente y la geometría del cátodo.

2.5.3 CARACTERÍSTICAS DEL RECUBRIMIENTO [9]

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 substrato, donde se impactan, deforman y resolidifican para formar el recubrimiento. El alto grado de partículas fundidas y la alta velocidad de partícula deja depósitos de alta densidad y elevados esfuerzos de unión (34 a 69MPa) comparados con los recubrimientos por flama o arco eléctrico. La baja porosidad de los recubrimientos por proyección por plasma pueden 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 de 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 2 figuras siguientes muestran la micro-estructura típica de la proyección por plasma, ilustrando la oxidación del recubrimiento.



Un cierto número de pasos clave son requeridos para producir recubrimientos óptimos por proyección térmica. Por ejemplo, para asegurar una adecuada adhesión del recubrimiento, es crítico que el sustrato sea apropiadamente preparado. La superficie del sustrato debe estar limpia, y usualmente debe estar rugosa después de limpiarla mediante sandblast o alguna otra forma. Una mala sujeción y el precalentamiento del sustrato deben ser tomados en cuenta antes de la aplicación del recubrimiento por proyección térmica.

La calidad de los recubrimientos también depende de parámetros o variables como los modelos ó 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 aun más la calidad de los recubrimientos por proyección térmica. Esas 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 ó flamas, manipuladores, etc.) alimentación de materiales (polvos, alambres ó barras) y el saber como de los procesos (la experiencia). Solo cuando todos los componentes del proceso son usados correctamente se obtiene un recubrimiento bien diseñado.

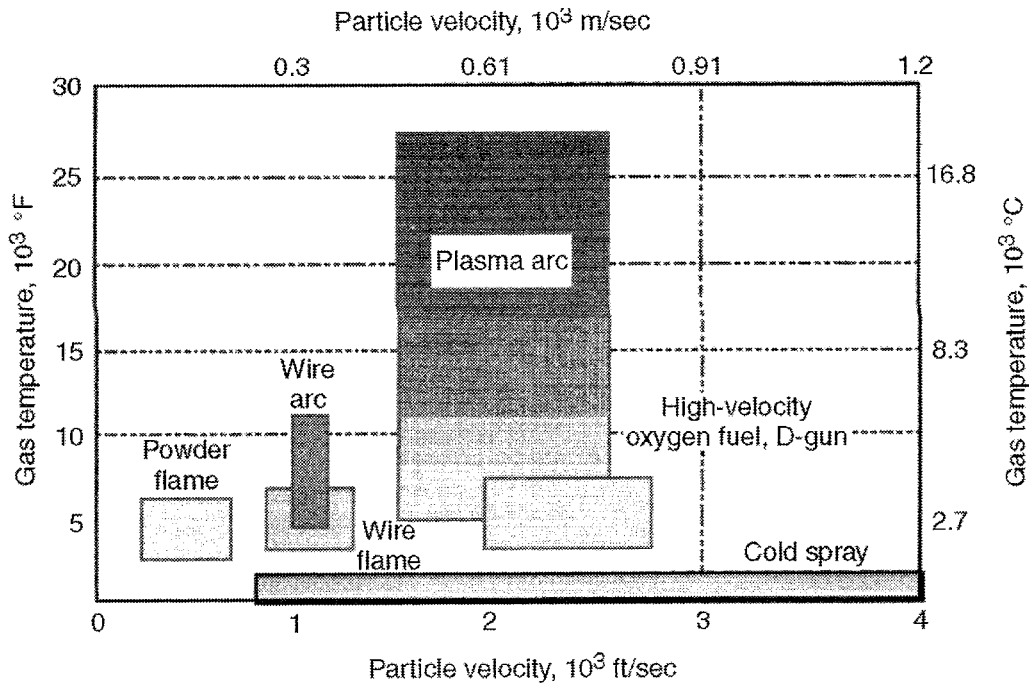
2.6 PROCESO DE ROCIADO EN FRÍO (COLD SPRAY) [10]

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 μm 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/divergentes para desarrollar chorros de gas a alta velocidad.

El mecanismo por el cual las partículas de estado sólido deforman y se adhieren tanto al sustrato como 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 altas 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 pero se ha intentado depositar materiales duros o frágiles tales como los cerámicos, los cuales no han sido bien depositados sin que ellos sean codepositados con una matriz de materiales dúctiles.

La optimización del proceso se basa en los parámetros operacionales de cada particular, dispositivos de aplicación (típicamente una tobera para gas) que permita una adecuada distribución de las velocidades de partícula para producir las propiedades físicas deseadas del depósito para un material dado. Típicamente, dichos parámetros incluyen la temperatura de precalentamiento del gas, la presión, la geometría de la boquilla, y el tamaño de la garganta. Un parámetro de proceso crítico es la alimentación de los polvos en sí misma (principalmente la distribución en el tamaño de las partículas y los atributos de las partículas tales como sus propiedades mecánicas y las cubiertas de óxido de dichas partículas) las cuales en la capacidad para formar una capa compacta. Los parámetros operacionales se seleccionan típicamente para lograr el recubrimiento más adecuado para la aplicación pretendida a las más bajas temperaturas y flujos de gas.

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 como la oxidación por alta temperatura, la evaporación, la fusión, la recristalización, la inducción de esfuerzos residuales, la desadhesión y otros efectos asociados con los métodos de proyección térmica son minimizados o eliminados.



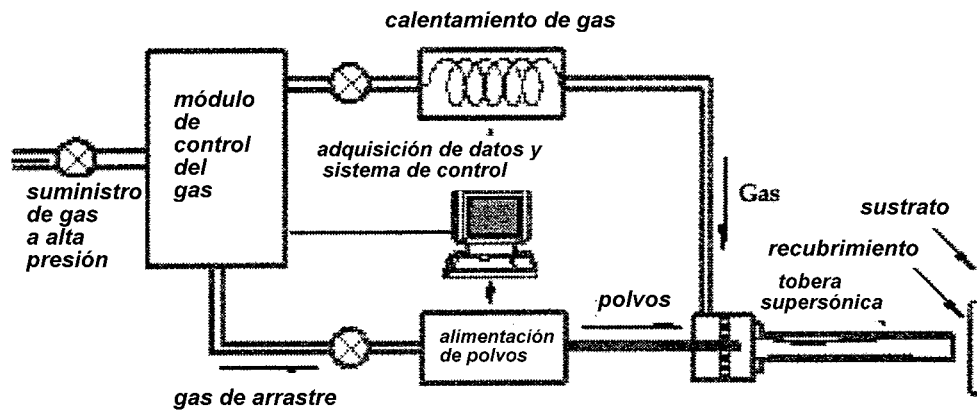
La figura anterior compara la velocidad de la partícula y los rangos de temperatura del gas de arrastre con otros procesos por proyección térmica. Cuando la velocidad de la partícula (V_p) es demasiado baja para una combinación dada de recubrimiento/sustrato, las partículas de alimentación son simplemente 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 de 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.

Una patente Norteamericana fue desarrollada en 1994 y la patente europea en 1995. Actualmente, una variedad de investigación en rociado en frío está siendo conducida en diferentes instituciones en los Estados Unidos, Rusia, Alemania y Japón. Dichos estudios incluyen dinámica de gases, la física del impacto de partículas a alta velocidad, materiales en polvo, métodos de aplicación novedosos, y el desarrollo de aplicaciones específicas.

2.6.1 EQUIPO PARA ROCIADO EN FRÍO Y SUS PARÁMETROS DE PROCESO [10]

La siguiente figura 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 a las partículas, sino para que el gas alcance velocidades supersónicas para que las partículas tengan un impacto de muy alta energía cinética. El gas de alta presión se 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 a 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.



En una novedosa adaptación de estas tecnologías, Kashirin y colegas han empleado la inyección “aguas a bajo” de partículas, con lo que disminuyen la necesidad de la introducción de los polvos en un recipiente; con esta ubicación del punto de inyección también se disminuye la erosión de la boquilla y su contaminación asociada con los flujos de partículas ubicados “aguas arriba” del orificio de la boquilla. Los parámetros típicos del chorro de gas usados para rociado en frío se resumen en la siguiente tabla:

Presión de estancamiento en el chorro	1-3 Mpa
Temperatura de salida del chorro	0-700 °C
Gasto volumétrico del flujo	1-2 m ³ /min
Tasa de alimentación de polvos	2-8 Kg/h
Distancia de rociado	10-50 mm
Tamaño de partícula	1-50 μm

Los gases de 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 algunos materiales sin promover su oxidación, y también por que es mucho menos costoso que el helio. El nitrógeno puede ser suministrado al sistema mediante tanques que lo contengan en su forma líquida pero, antes de su introducción al sistema, debe ser comprimido para que alcance la presión de trabajo apropiada. Para algunos materiales, las velocidades desarrolladas por las partículas por el nitrógeno no son suficientes para producir una alta eficiencia de deposición o recubrimientos de alta calidad. El helio es capaz de desarrollar el chorro de más alta velocidad, por lo que puede ser usado para depositar la más extensa gama de materiales. El helio puede ser diluido con nitrógeno para hacer el proceso más económico. En un esfuerzo por hacer más rentable el proceso usando helio sin diluir, se ha demostrado que el uso de sistemas de recuperación de recuperación de helio depende de un alto volumen de producción de recubrimientos, es decir, el volumen de producción debe ser suficiente para cubrir y recuperar el costo de arrendamiento o compra del equipo de reciclaje.

2.6.2 EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL RECUBRIMIENTO [10]

Al igual que en otros procesos de proyección térmica, los parámetros de proceso para rociado en frío afectan a la eficiencia de deposición y las propiedades de los recubrimientos obtenidos. Se ha observado que los parámetros de proceso varían mucho en relación al material con el que está hecho el recubrimiento. Por ejemplo, el aluminio puede ser rociado a temperaturas tan bajas como 120°C mientras que los (M)CrAlY requieren 650°C. Los valores típicos encontrados en la eficiencia de deposición varían entre el 20 y 80% dependiendo de la composición del gas, la temperatura y la presión. Se ha encontrado que los parámetros de proceso afectan a la microestructura del recubrimiento, provocando variaciones en sus propiedades mecánicas y térmicas. Por ejemplo, se ha encontrado una variación entre la dureza y el módulo de elasticidad del recubrimiento como función de la temperatura del gas. Ha quedado claro a los profesionales en este campo que las características de los polvos afectan tanto a la capacidad para formar recubrimientos mediante rociado en frío como a la naturaleza de dichos depósitos.

Las propiedades mecánicas a tensión de los recubrimientos por rociado en frío son generalmente mucho mejores que aquellas obtenidas mediante otros procesos de proyección térmica. Sin embargo, la ductilidad de los recubrimientos rociados en frío es generalmente muy baja debido al gran endurecimiento por trabajo en frío que es inherente al proceso de deposición. En resumen, los recubrimientos rociados en frío

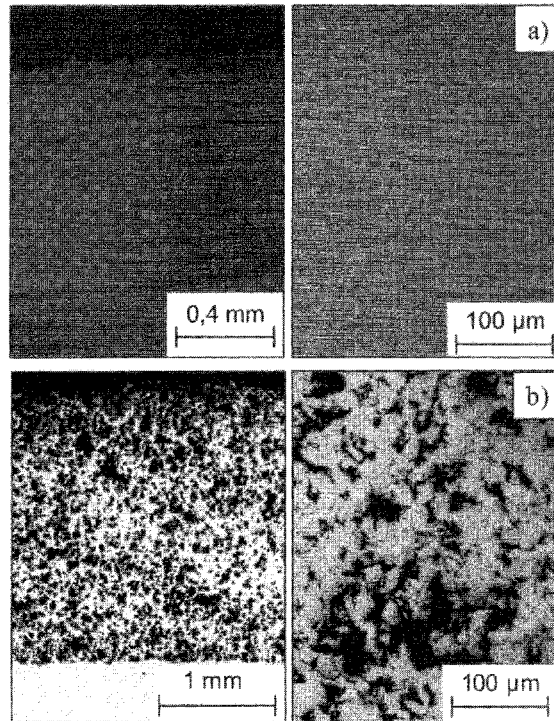
presentan una baja ductilidad y una alta resistencia a la tensión comparados con las propiedades del material en bruto. El tratamiento térmico a altas temperaturas de dichos recubrimientos les confiere suficiente ductilidad.

2.6.3 MATERIALES CON LOS QUE ESTÁN HECHOS LOS RECUBRIMIENTOS PARA ROCIADO EN FRÍO Y SUS APLICACIONES [10]

Una extensa variedad de materiales han sido aplicados mediante rociado en frío, incluyendo metales puros, aleaciones metálicas ferrosas y no ferrosas, aleaciones metálicas, compuestos y cermets, ejemplos de los cuales se muestran en la siguiente lista:

- Metales puros: Cobre, aluminio, titanio, plata, níquel, zinc, molibdeno, hierro.
- Aceros de baja aleación: Ancorsteel 1000
- Aleaciones Níquel-Cromo: 50 Ni-50Cr, 60Ni-40Cr, 80NI-20Cr
- Superalaciones base níquel: Aleación 625, Aleación 718, Hastelloy C
- Aceros inoxidables: Tipo 316/316L, Tipo 420, Tipo 440
- Aleaciones de zinc: Zn-20Al
- Aleaciones de aluminio: 1100, 6061
- Aleaciones de cobre: C95800 (Ni, Al y bronce)
- MCrAlY
- Compuestos/Cermets: WC-Co, Cr_3C_2 -NiCr, Fe-NdFeB, Al-Cu

La siguiente figura muestra la microestructura típica de recubrimientos de titanio sobre aluminio obtenidos por rociado en frío usando nitrógeno como gas de proceso. En la primera figura se ve un recubrimiento denso, en la segunda figura se ve un recubrimiento poroso empleado en prótesis de hueso.



Las aplicaciones actuales y en desarrollo para los recubrimientos rociados en frío incluyen aplicaciones eléctricas/electrónicas (cobre y Fe-NdFeB), aeroespaciales (MCrAlY), automotrices (Al y Zn), químicas (Ti), anillos multicapas (Zn-Cu-Al) y polímeros conductores.

2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS GENERALES DE LOS PROCESOS PROYECCIÓN TÉRMICA [13].

Los recubrimientos por proyección térmica exhiben una arquitectura micro-estructural única en su género. Los recubrimientos son formados por partículas fundidas y semi-fundidas 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.

2.7.1 VENTAJAS [13].

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.

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 altos 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, 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 mínima 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 150 °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, carburización, 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 6.5mm 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 para la proyección térmica es de un costo relativamente bajo (va de \$7000 USD a 10,000 USD para combustión de baja velocidad ó 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 45kg/h (2 a 100lb/h) o más. Típicamente, de 2 a 7kg/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 siguiente tabla muestra los procesos de proyección térmica empleados en varios sectores industriales.

Sector Industrial	flama	Rociar/fundir	HVOF	D-Gun	Arco de plasma al aire	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		

La siguiente tabla muestra los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica empleados en varios 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
Minera		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	

La siguiente tabla muestra los usos de los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica de importancia en varios sectores industriales.

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		
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
Fretting	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

Como se resume en la tabla anterior esas 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)

2.7.1.1 ÁREAS DE FUTURO CRECIMIENTO. [6], [21]

Como ya se discutió antes, los FGMs ofrecen a la industria de la proyección térmica un número de oportunidades para su crecimiento. Otras áreas importantes que determinarán el creciente 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.
- 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 y 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.
- Nuevos materiales (compuestos, materiales nanofase, perovskitas, zirconatos, etc.)

2.7.2 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 consideradas ó fueron pobremente entendidas.

- **Bajo esfuerzo de adhesión.**

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 83Mpa (de 6 a 12ksi). Los procesos de chapeado, soldadura y deposición de vapor usualmente tienen valores mínimos de 103Mpa (15ksi), dependiendo del recubrimiento y la química del sustrato. La adhesión en el proceso de soldadura es por supuesto substancialmente más elevada de 103Mpa.

- **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 ó presurización

isostática en caliente. La porosidad puede ser minimizada usando HVOF o 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 resisten impactos. Los procesos de soldadura dan el mejor volumen de recubrimiento para 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 dado que las porosidades subyacentes fallan al soportar las cargas concentradas y el recubrimiento se colapsa, resultando en una deformación permanente de la superficie.

- **Proceso no 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 limitados por las restricciones de la acción del proceso sobre áreas específicas del sustrato incluyen a la implantación iónica y la PVD.

CAPÍTULO 3. OPERACIONES PREVIAS A LA APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA

3.1 PROCESAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO [14]

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 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 ó 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, y otras cintas no lo hacen.

Precalear, 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. Substratos de aluminio, cobre y titanio normalmente no se precalientan. Precalear en exceso debe ser evitado, dado que esto puede oxidar la superficie y deteriorar la unión.

3.2 METALURGIA E HISTORIA TÉRMICA DE LOS SUBSTRATOS [14]

El tipo de material del sustrato, dureza y tenacidad previo a un tratamiento térmico, debe ser determinado para evaluar como 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.

3.3 ACEROS ALEADOS Y AL CARBONO [14]

Generalmente los aceros vienen tratados térmicamente, con dureza 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 40HRC, es difícil lograr una rugosidad superficial con granitos de arena 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 ó pandeo.

3.4 ACEROS INOXIDABLES Y ALEACIONES DE NÍQUEL [14]

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 comienza a proyectar inmediatamente cuando esa temperatura es registrada.

3.5 ALEACIONES DE ALUMINIO, COBRE, MAGNESIO Y TITANIO [14]

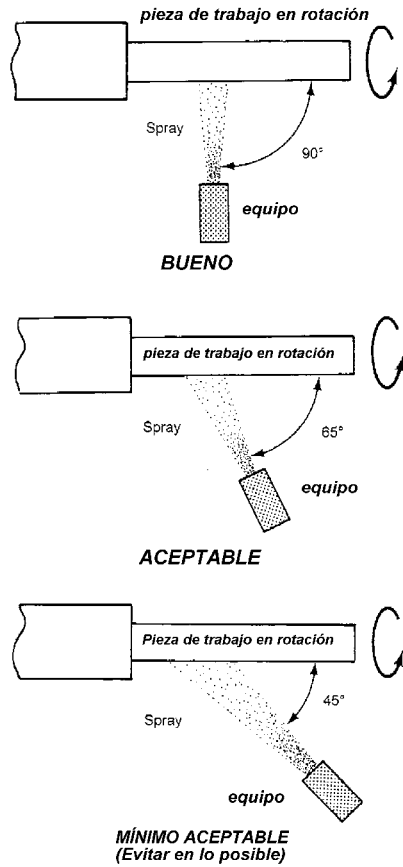
Requieren un manejo especial cuando se usan granitos de arena abrasiva para crear la rugosidad. Se evitará el precalentamiento antes de proyectar. Una pequeña cantidad de calor aplicado a la superficie la convierte rápidamente en capas de óxidos. (TiO_2 , Al_2O_3), lo cual produce una mala adhesión.

3.6 COMPONENTES FUNDIDOS O POR METALURGIA DE POLVOS.[14]

Este tipo de piezas pueden requerir de una limpieza especial.

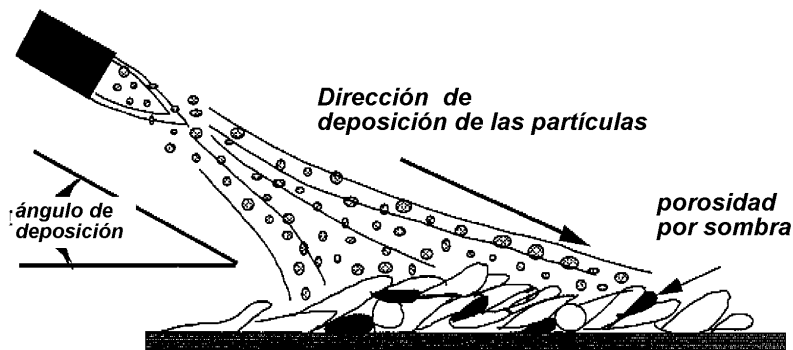
3.7 CONFIGURACIÓN DE LA PIEZA Y LOCALIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO [14]

Una vez que el área donde el recubrimiento va a ser aplicado ha sido identificada, se determina 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 la superficie tan cercano a una posición normal (90°) como sea posible; el mínimo ángulo de impacto aceptable es de 45° del área objetivo; como se muestra en la siguiente figura.



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. Ambos, el esfuerzo de adhesión y cohesión del recubrimiento serán afectados.

La porosidad incrementa dramáticamente conforme el ángulo de la flama se mueve de la posición normal a 45°, como se muestra en la siguiente figura.

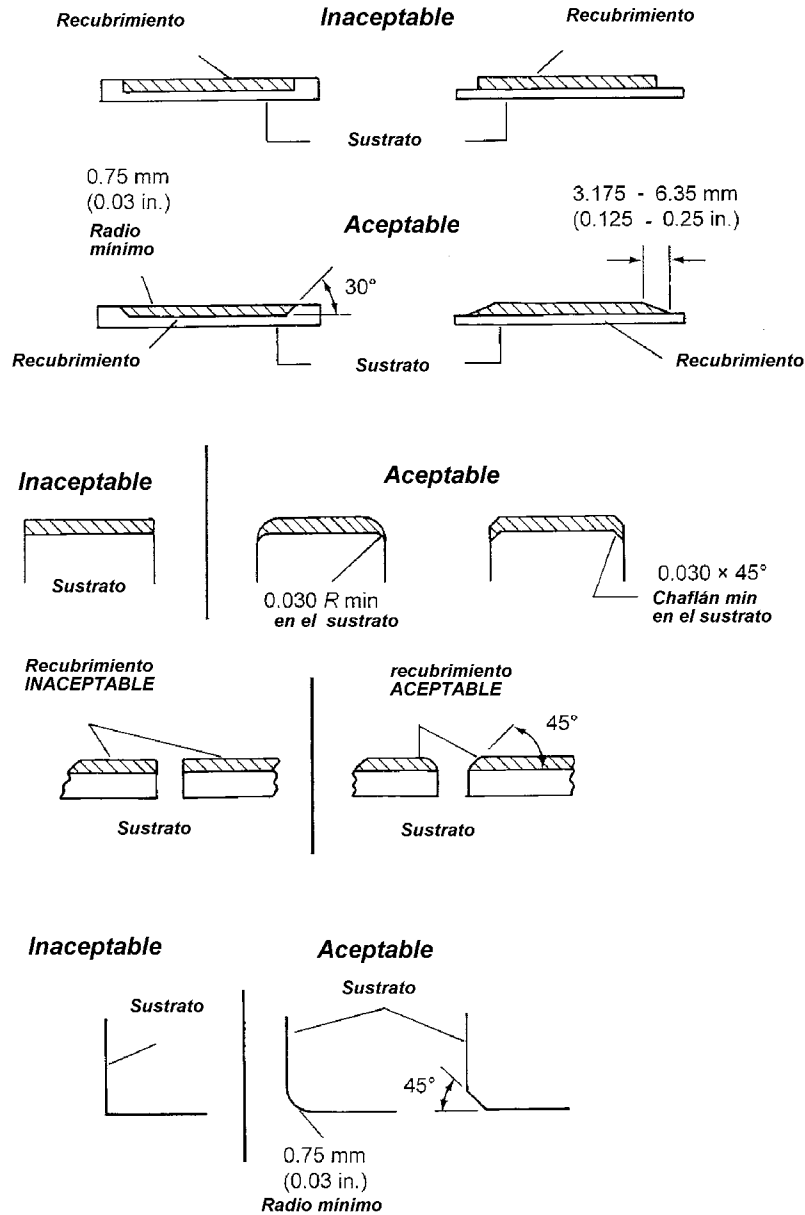


Si la proyección debe hacerse a ángulos que van de 90° a 45°, primero se debe considerar si el recubrimiento considerado será capaz de funcionar como se requiere. Para obtener esta información, se proyecta una muestra de recubrimiento al ángulo de impacto esperado y se prueba su integridad antes de querer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

El substrato debe ser inspeccionado de defectos e imperfecciones, especialmente de grietas. Las grietas estructurales serán reflejadas en la proyección del recubrimiento. Las grietas no pueden ser reparadas usando la proyección de un recubrimiento, ni añade resistencia al substrato. Los recubrimientos proyectados solo aumentan la superficie del substrato y adicionan dimensión, pero no actúa como elemento estructural que provea de esfuerzo a la tensión, resistencia a la fatiga ó tenacidad de fractura.

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

- Cuando el área objetivo del substrato es socavada para aceptar el recubrimiento, como se muestra en la primera de las 3 siguientes figuras, siempre se hace un chaflán ó se redondean las esquinas antes de proyectar. Esquinas puntiagudas ó de 90° sueltan partículas, polvo y desechos y dejan áreas porosas. Las partículas proyectadas son improbables de cubrir la esquina.
- Del mismo modo, el extremo de un recubrimiento proyectado transversal a la cara del substrato, como se muestra en la segunda figura, debe realizarse un chaflán o redondearse. 0.75mm de radio o 45° son recomendables. Las cargas aplicadas a los extremos de los recubrimientos que no han sido redondeados o achaflanados les causarán grietas y fracturas. Si el substrato lo permite, es una buena práctica que se redondee o se hagan chaflanes al mismo antes de proyectar sobre el.
- La tercera figura muestra prácticas aceptables para depositar un recubrimiento sobre un substrato. 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 esfuerzo.



3.8 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE [14]

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

3.8.1 LIMPIEZA [14]

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. 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 comúnmente utilizados son:
 1. Metil-etil-cetona (MEK)
 2. Acetona
 3. 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. 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 desprenda.
- **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 200 (74µm) en óxido de aluminio es preferible. Inhibidores de la corrosión y compuestos antisolidificantes se agregan normalmente. Desde que estos procesos dependen de un abrasivo para limpiar, pueden ser usados para remover escoria, productos de la corrosión, pintura, aceites y grasas.
- **Ráfagas de abrasivos en seco.** Remueven contaminantes de la superficie. Más agresivo que el rectificado por 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.

3.8.2 RUGOSIDAD [14]

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 adhesión del recubrimiento. Los métodos principales usados para crear rugosidad superficial son:

- Ráfagas de granitos de arena en seco.
- Maquinado ó macrorugosidad.
- 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 aplicó ráfagas de granitos de arena, da el más alto esfuerzo de unión; o bien también si se realizan las ráfagas de granitos 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.

3.8.3 RÁFAGAS DE PERDIGONES EN SECO [14]

Es la técnica para creación de 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.

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 compresión 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.

3.8.4 VARIABLES DE LAS RÁFAGAS DE PERDIGONES [14]

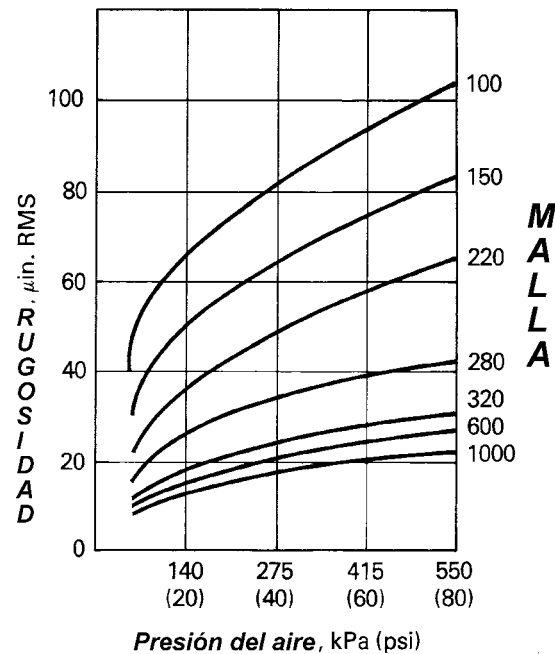
Las variables que determinan el tamaño y geometría de las irregularidades de la superficie incluyen el tamaño, forma, dureza, densidad específica y química de las partículas abrasivas, además de su velocidad y ángulo de choque. La dureza del material base y uniformidad de la operación de ráfagas de perdigones son otras variables importantes.

- **Tamaño del grano abrasivo.** Dado que la masa de un grano abrasivo varía al cubo de su diámetro, la fuerza de impacto de una partícula abrasiva de malla 20 (840 μm), por ejemplo, será ocho veces que la de una partícula (solo aplica si es esférica la partícula) de malla 40 (420 μm). Consecuentemente, una partícula más grande cortará más profundo. En la preparación de superficies donde serán aplicados recubrimientos relativamente delgados de metales duros, tamaños de malla de partícula abrasiva de 8 a 20 (2380 a 840 μm) serán requeridos generalmente. Para recubrimientos de zinc o de aluminio se requieren tamaños de malla de 12 a 50.
- **Valores de rugosidad superficial.** Se expresan generalmente en micropulgadas o en micrómetros. La American National Standard para mediciones de rugosidad superficial la llama desviación aritmética promedio de la media (ANSI B46.1-1978, "Surface Texture", ASME). El valor RMS es usado comúnmente también. La rugosidad superficial es medida fácilmente con instrumentos disponibles en el mercado para medición de alturas de todos los picos y valles de la superficie.
- **Forma de la partícula.** Lo angulado de las partículas abrasivas afecta ampliamente la profundidad y forma de los huecos de la superficie del sustrato. Ráfagas de partículas redondeadas harán muescas suaves y redondeadas, resultando una muy pequeña o nula unión. Por lo anterior se hace más necesario utilizar partículas anguladas y con lados cortantes para dar una unión más fuerte.
- **Dureza de la partícula.** Las partículas de las ráfagas deben ser lo suficientemente duras para cortar eficientemente, pero no quebradizas como para hacerse añicos excesivamente. Cierta tenacidad (ductilidad) es deseable para evitar una rápida fractura.
- **Gravedad específica (Densidad) de las partículas.** Los granitos angulares acerados (granalla) tienen cerca del doble de densidad del abrasivo no metálico más pesado y tienen de igual manera cerca del doble de energía de impacto si se proyectan a la misma velocidad, para igual tamaño de partículas. Lo anterior resulta en una penetración más profunda, y muchos usuarios consideran a la granalla como el más conveniente de los abrasivos para trabajar.

- **Velocidad del chorro.** Con cualquier tipo de abrasivo, la fuerza de impacto varía directamente con la velocidad del impacto. Por lo tanto, presiones más altas resultan en penetraciones más profundas. Con abrasivos no metálicos, las altas presiones resultan en un rápido desquebrajamiento de las partículas, y por esta razón las presiones del chorro se reducen para dar mayor durabilidad a las mismas.
- **Ángulo de impacto.** Se ha mostrado que si una superficie es limpiada con arena a un ángulo en una dirección y luego se proyecta en la dirección opuesta, resulta en una débil adhesión de las partículas. Esto claramente demuestra que las partículas de metal proyectadas deben penetrar en las asperezas de la superficie para un anclaje mecánico del recubrimiento con la superficie. Se considera esencial que el ángulo de afectación de las ráfagas de arena sea similar al de proyección del recubrimiento y preferentemente deberá mantenerse cercano a 90° respecto a la superficie del substrato si se desea una máxima adhesión.
- **Dureza del material del substrato.** Existen dos razones del por que no es posible obtener una fuerte adhesión a metales duros a través de las ráfagas de perdigones ó del baño con arena. Primero, es difícil o imposible cortar la superficie a la profundidad requerida. Segundo, y punto más importante, los materiales duros carecen de ductilidad y la superficie del metal no puede ser desplazada de manera que provea de asperezas ó rugosidad adecuada. Cuando el acero suave es limpiado con arena, partículas abrasivas golpean la superficie adyacente a la previamente cortada y desplazarán plásticamente el metal del lado de la cavidad creada para formar un anclaje o cola de milano. En aceros endurecidos, el metal desplazado continuamente se fractura en vez de deformarse para producir el anclaje.
- **Uniformidad de la operación de ráfagas de perdigones.** Simplemente no es suficiente limpiar con perdigones hasta que las superficies está razonablemente áspera. Si el anclaje se está formando, es necesario continuar la limpieza un poco por debajo del punto al cual la superficie parece estar completamente terminada. Esto asegurará que un gran número de agujeros hayan sido deformados lo suficiente para proveer de cavidades y anclas. Cuando se usan granos de alúmina, debe asegurarse que la misma no se encuentre incrustada en el substrato, dado que en esta condición disminuirá sustancialmente la adhesión. Una limpieza ultrasónica después de la limpieza con perdigones puede ayudar al respecto.
- **Tamaño de los detalles superficiales.** La importancia del tamaño de los detalles superficiales del substrato preparado debe ser enfatizado. Altos esfuerzos residuales a tensión se desarrollan paralelos a la superficie en los metales proyectados. Los metales proyectados poseen una ductilidad limitada; por lo tanto, muy poco desplazamiento lateral de cualquier parte del recubrimiento con respecto a la superficie del substrato resultará en el cizallado de las anclas de metal proyectado.

Las cavidades producidas por ráfagas de perdigones pesados sobre superficies de acero, usando por ejemplo granalla G-16¹ hecha de hierro templado, van de 125 a 240µm de profundidad a más de 750 a 960µm de ancho. Irregularidades de este orden de magnitud proveen de una resistencia substancial al cizallado. Lo anterior es más o menos aparente, dado que una resistencia al corte más efectiva puede ser obtenida mediante macro-rugosidad en la superficie del sustrato, como la producida por ranurado o por roscado antes del baño de partículas.

Observe la siguiente figura como guía de rugosidad superficial esperada mediante el uso de alúmina de varios tamaños de grano en sustratos típicos.



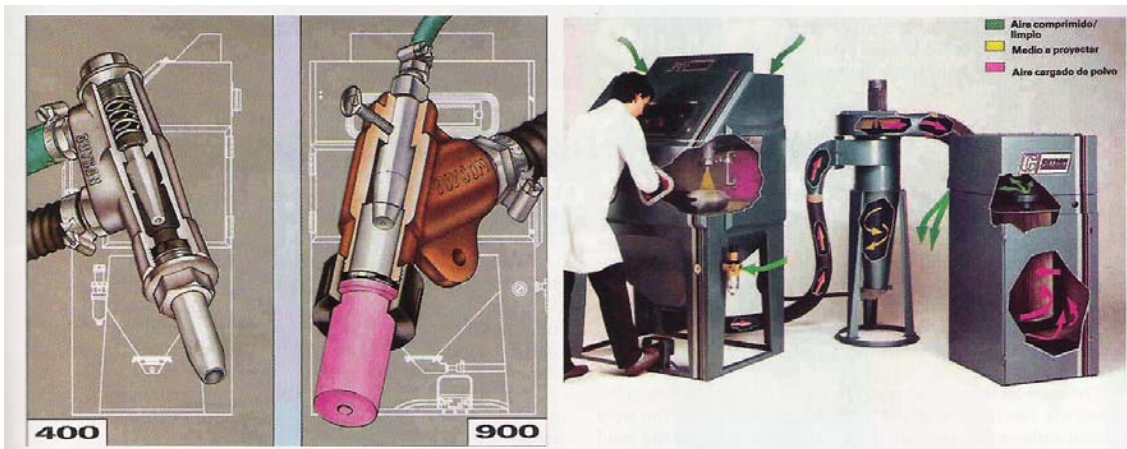
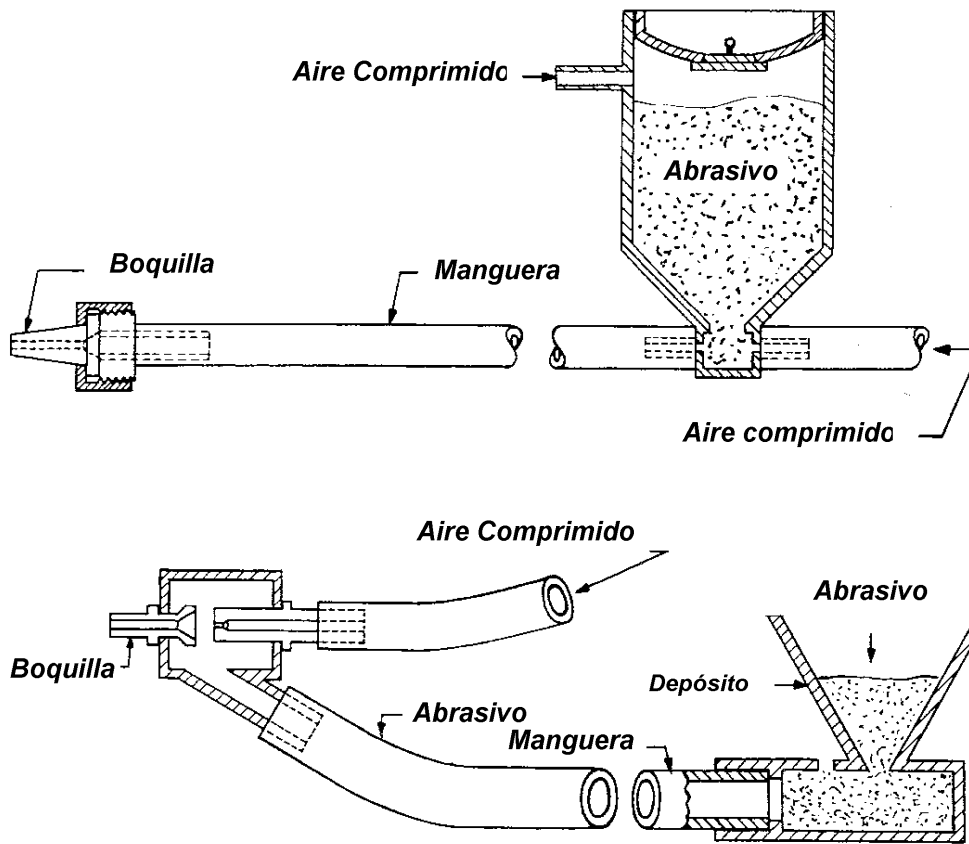
3.8.5 EQUIPO USADO PARA LA ABRASIÓN CON RÁFAGAS DE PERDIGONES. [14]

Hay tres tipos básicos de equipos:

- Máquinas a presión ó “generadores de ráfagas”
- Cabinas para ráfagas con boquillas de tipo succión
- Máquinas de ráfaga centrífugas ó “libres de aire”
- **Máquinas a presión.** Son usadas generalmente para trabajos exteriores, desde que proveen de velocidades de abrasión más grandes y usan el aire más eficientemente que las de alimentación tipo succión. (vea las 4 siguientes figuras).

[25] ¹ El tamaño de la granalla se indica por un número de identificación, por ejemplo G40 para granalla de hierro fundido o No. 60 para granos abrasivos no metálicos tales como los de alúmina. El tamaño de granalla se determina usando tamices conformes a la norma ASTM E 11-87. La norma SAE J444 contiene las especificaciones de tamaño para la granalla de hierro fundido. Por ejemplo el G40 al 100% debe tener un tamaño de malla de -40, > al 70% +malla 40, > 80% +malla 80. La especificación del tamaño de grano para granalla no metálica se especifica en la norma ANSI B74.12

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





- **Cabinas para ráfagas.** Usualmente emplean boquillas de tipo succión (Figura anterior). 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 para trabajos pequeños. Las partículas abrasivas son reutilizables y el operador no requiere de ropa protectora especial.
- **Máquinas de ráfaga centrífugas.** 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.

3.8.6 ABRASIVOS [14]

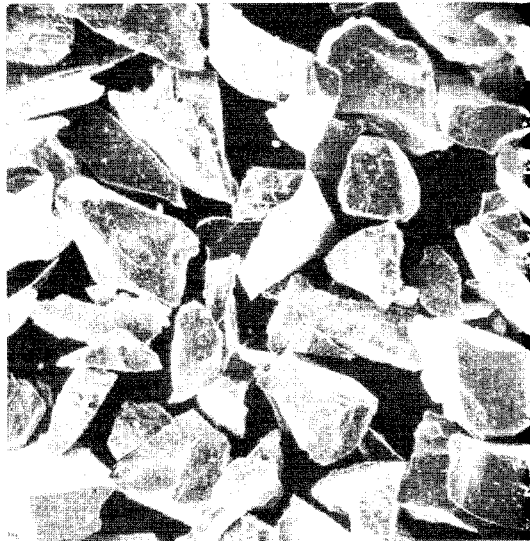
- **Granalla angulada de hierro templado.** Es el abrasivo más usado para máquinas de presión en cabinas, tiene una dureza de 60 a 62 HRC, y puede ser usada en sustratos de materiales tan duros como 40 a 45 HRC. La granalla de hierro templado se mantiene afilada más tiempo, y se fractura durante su uso para producir nuevos y afilados lados cortantes. En muchas aplicaciones una mezcla de tamaños de grano es más eficiente que un solo tamaño. El mantenimiento de una correcta distribución de tamaño de partícula requiere de pequeñas y frecuentes adiciones del tamaño más áspero en la mezcla. El rompimiento normal mantiene la distribución del tamaño de partícula en un balance adecuado. Un exceso de partículas finas deberá ser removido por tamizado ó por aire.

La adición de partículas abrasivas debe ser la partícula más pequeña que produce las características deseadas. Las máquinas de ráfagas arrojan cierta cantidad de libras por minuto de partículas. Una libra de grano G-18 contiene 38,000

partículas, un G-25 contiene 150,000 y un G-40 contiene 520,000. Los grados G-18 o G16 no trabajan de buena manera en cabinas, pero G-25 y G-40 mezclados son satisfactorios.

- **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 substratos 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 superior siguiente) y 150 (figura inferior siguiente) se muestran a continuación.



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

- **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 de 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 (Si C).** 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 ciertos tipos de hornos. La escoria molida es angulada y se tienen disponibles muchos tamaños de malla.

3.9 ¿CUANDO COMENZAR A PROYECTAR?[14]

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.

3.10 APLICACIÓN DE UNA CAPA DE ADHESIÓN. [14]

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.

3.10.1 MATERIALES EN LOS QUE LAS CAPAS DE ADHESIÓN SON AUTO-ADHERIBLES [14]

- Todos los aceros comunes.
- Aceros inoxidables, series 300 y 400.
- Aceros aleados endurecidos.
- Monel (aleación de Níquel y Cobre)
- Níquel y sus aleaciones.

- Cobalto y sus aleaciones.
- Cromo y sus aleaciones.
- Hierro fundido.
- Acero fundido.
- Titanio y sus aleaciones.

3.10.2 MATERIALES EN LOS QUE LAS CAPAS DE ADHESIÓN NO SON AUTO-ADHERIBLES [14]

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

3.10.3 MECANISMO DE ADHESIVIDAD [14]

El mecanismo por el cual los recubrimientos por proyección térmica se adhieren a sustratos metálicos no ha sido estudiado extensamente. 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 aumentando 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 aleación 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.

3.11 ¿POR QUÉ USAR UNA CAPA DE ADHESIÓN? [14]

- 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 puede 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 125µm. Muchos materiales capas de adhesión pueden ser aplicados como una solución de recubrimiento para restauración dimensional.

3.11.1 DISPONIBILIDAD DE MATERIALES DE CAPAS DE ADHESIÓN [14]

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

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

3.12 SOCAVACIÓN (DURANTE LA REPARACIÓN Y RESTAURACIÓN DIMENSIONAL) [14]

Cuando las piezas serán reparadas, la superficie esta 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 último. Los recubrimientos proyectados no restaurarán 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, macro-rugosidad o capa de adhesión, dependiendo de la profundidad de la socavación y el material del recubrimiento escogido para proyectar.

3.13 ENMASCARAMIENTO [14]

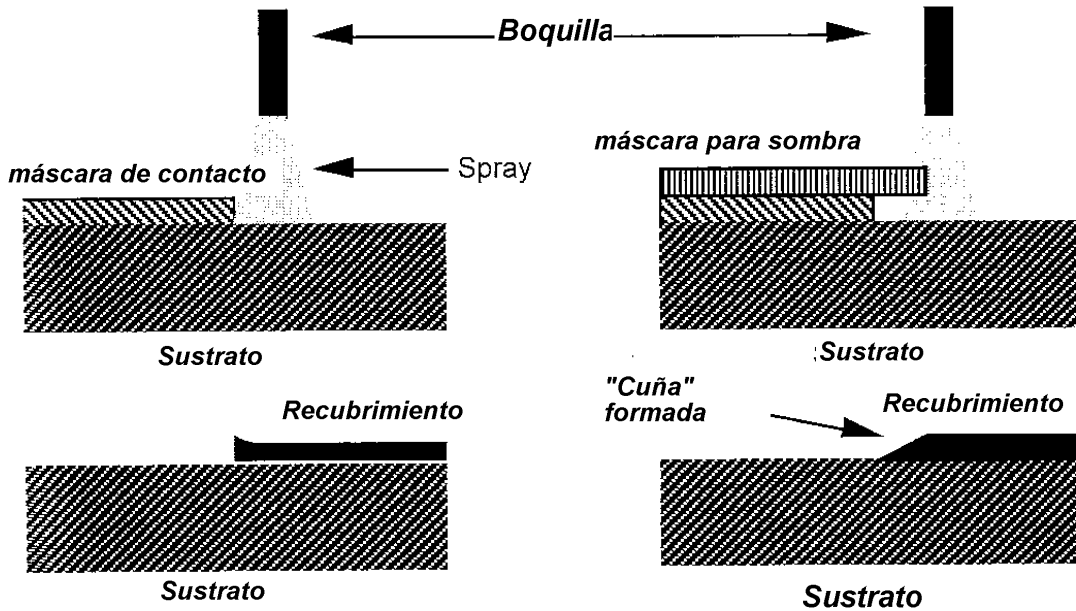


Varias técnicas de enmascaramiento han sido desarrolladas para proteger áreas cercanas a la zona objetivo de los impactos de la proyección de partículas. La figura anterior muestra la protección de un área mediante este método. En los métodos se incluyen:

- Máscaras de sombras de metal
- Cintas duras de alta temperatura, incluyendo silicón con dos lados pegajosos, resistentes a las ráfagas de perdigones y 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.

3.13.1 MÁSCARAS DE SOMBRAS DE METAL [14]

Son situadas aproximadamente a dos o tres veces el espesor total del recubrimiento de la pieza que va a ser proyectada y en frente de la flama de proyección, protegiendo las áreas seleccionadas de los depósitos de la proyección, lo cual es mostrado en la siguiente figura.



El área de proyección objetivo puede ser estacionaria o rotatoria. La máscara es estacionaria y se ancla de manera segura. Conforme el chorro de proyección se dirige hacia el área objetivo y a la máscara, las partículas no deseadas proyectadas se colectan en la máscara previniendo que lleguen hasta el sustrato. El recubrimiento terminará en una franja en forma de cuña estrecha o mejor dicho, como una línea puntiaguda definida. Para apreciar lo anteriormente mencionado observe la figura anterior derecha.

En contraste al borde en forma de cuña, note que una máscara de contacto (vea la figura anterior izquierda), similar a la de cinta discutida anteriormente, deja un borde puntiagudo, el cual puede actuar como concentrador de esfuerzos que llevan a una delaminación del recubrimiento. Las máscaras de metal pueden ser utilizadas una y otra vez, sujetas solamente a la formación de bordes producidas por las partículas proyectadas y/o distorsión debido al calor del proceso mismo.

Las máscaras de hojas de metal son preferentemente usadas para la proyección con HVOF, dado que las cintas no se mantienen con los impactos de alta velocidad que se producen.

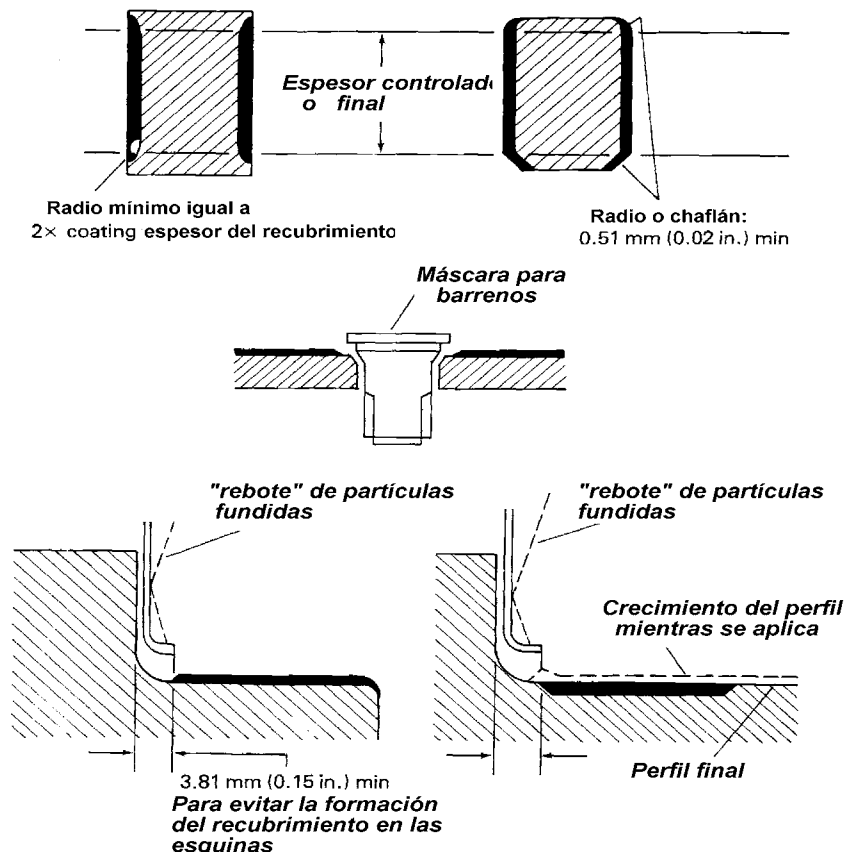
3.13.2 MÁSCARAS DE CINTA [14]

Son aplicadas manualmente cubriendo las áreas que no requieren recubrirse. Después de proyectar, la cinta es fácilmente removida, conteniendo la proyección acumulada, dejando limpias las áreas protegidas. Cada pieza requiere tener aplicada la cinta. Se dispone comercialmente de una amplia variedad de cintas, para resistencia a la abrasión por ráfagas de perdigones y otros procesos de proyección térmica. Las mejores cintas, por supuesto, poseen suficiente tenacidad para resistir ambas operaciones. Después de la

aplicación del recubrimiento, al remover la cinta esta deja una superficie limpia, pero si el recubrimiento es demasiado delgado puede producirse un despostillamiento.

3.13.3 CONFIGURACIONES ESPECIALES DEL ENMASCARAMIENTO [14]

Las técnicas de enmascaramiento se muestran en la siguiente figura. Las esquinas redondeadas son protegidas usando máscaras curvadas para mantener las partículas no fundidas y otros desechos alejados del recubrimiento. Las perforaciones pueden ser enmascaradas usando tapones simples cuyas tapas están encima de la superficie que va a ser cubierta.



3.13.4 COMPUESTOS Y PINTURAS PARA ENMASCARAR [14]

No son muy útiles para proteger superficies de las ráfagas de perdigones. Se dispone comercialmente de compuestos comprendidos de partículas refractarias, como el grafito disuelto en solventes o en agua. Pueden ser aplicados con brochas o en spray; cuando secan, la película previene que la proyección se adhiera y provee de protección al calor. Una exposición excesiva de los compuestos al chorro de proyección puede causar agrietamiento a la película y que posteriormente las partículas puedan adherirse al sustrato. Los residuos de los compuestos se remueven fácilmente enjuagando en agua o solvente, según sea el caso, la pieza.

3.14 PRECALENTAMIENTO [14]

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 pre-expandir el sustrato y subsecuentemente se contrae con el recubrimiento, reduciendo los esfuerzos residuales creados en el recubrimiento durante el enfriamiento.

3.14.1 TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO [14]

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

3.14.2 EQUIPO [14]

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

3.14.3 MATERIALES QUE NO DEBEN SER PRECALENTADOS [14]

En materiales como aluminio y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, titanio y aleaciones de manganeso, 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 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.

3.14.4 ACERO INOXIDABLE, SUPERALEACIONES Y ALEACIONES BASE NÍQUEL [14]

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 por que estos materiales y aleaciones forman óxidos refractarios que interfieren con el mecanismo de adhesión.

3.14.5 ATMÓSFERAS INERTES [14]

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

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

4.1 PATRÓN DE ROCIADO [15]

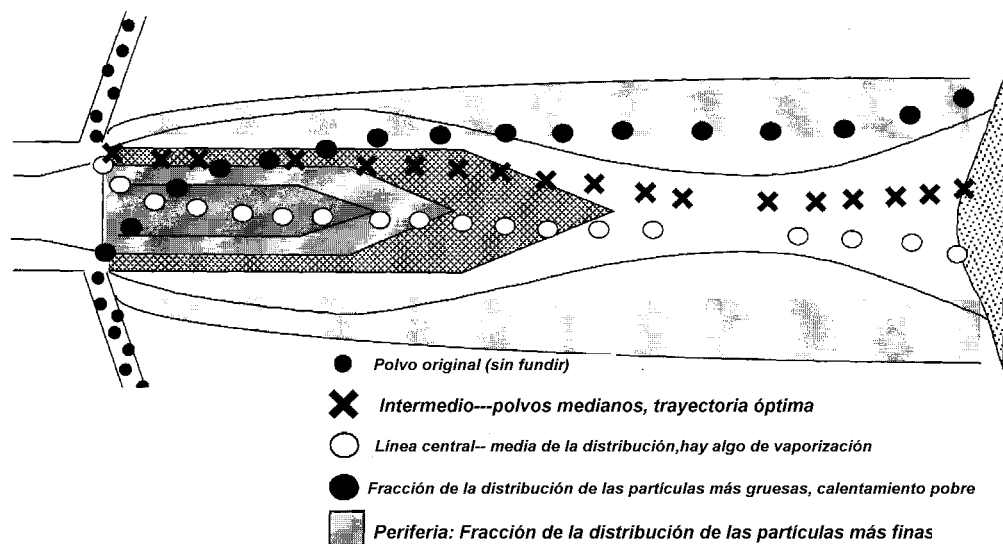
Las operaciones, los parámetros y variables de los procesos para la obtención de recubrimientos por proyección térmica incluyen:

- 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.

4.1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DEL PATRÓN DE ROCIADO [15]

A medida q el patrón de rociado se desarrolla, su composición y variaciones son aspectos fundamentales para el entendimiento de los recubrimientos por proyección térmica.

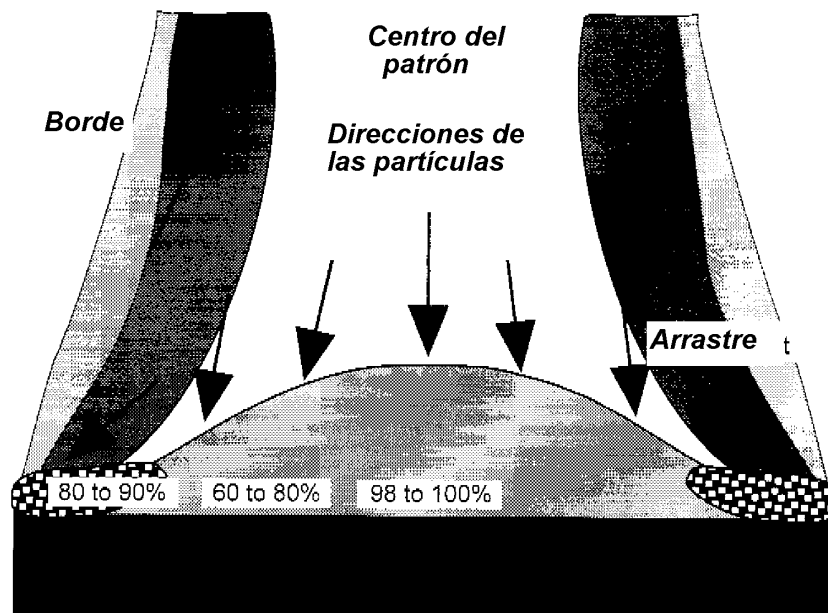
Sin importar qué equipo y material para proyectar se emplee, todos los procesos de proyección térmica involucran partículas fundidas o semifundidas, las cuales viajan a cierta velocidad arrastradas por una corriente de gas para impactarse sobre una superficie con el fin de formar un recubrimiento, lo anterior es mostrado en la siguiente figura. 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.



La figura anterior 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 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 siguiente figura muestra un corte transversal del patrón de rociado. En una vista paralela a la superficie del sustrato el patrón de rociado tiene 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°.



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.

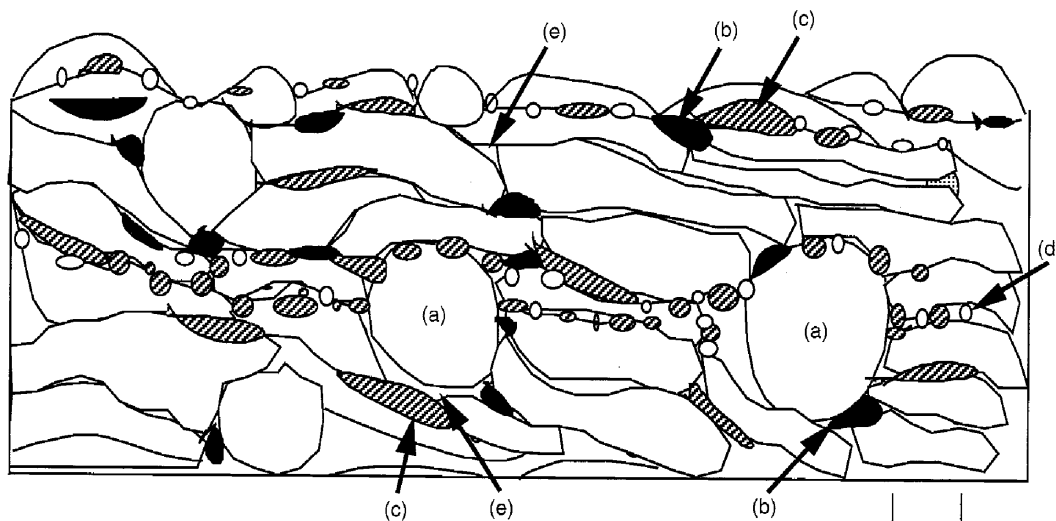
El fenómeno del patrón de rociado descrito en las figuras anteriores se aplica a todos los procesos de recubrimientos por proyección térmica descritos. Las variables de entrada al sistema comunes para todos los procesos (como el tipo de gas, la densidad y velocidad, la

energía calorífica empleada, la distribución en el tamaño de las partículas, la gravedad específica de éstas y los flujos del 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 [15]

4.2.1 MICROESTRUCTURA TÍPICA DEL RECUBRIMIENTO [15]

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 tal y como se ilustra en la siguiente figura:

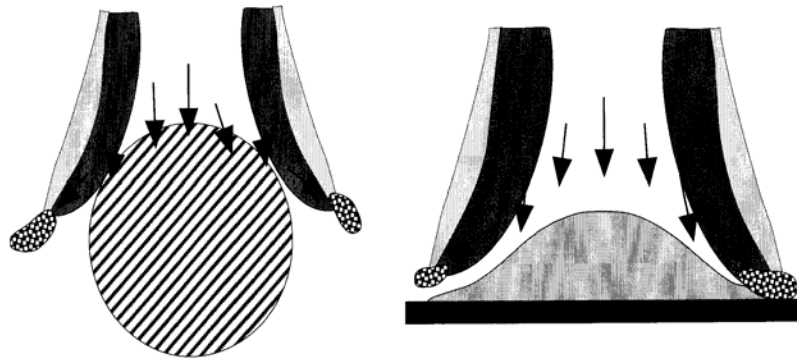


(a) Partículas sin fundir. (b) Óxidos. (c) Impurezas. (d) Partículas finas. (e) Porosidades. 10 μm

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 DE LA PARTE EN EL AUMENTO DE ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO [15]

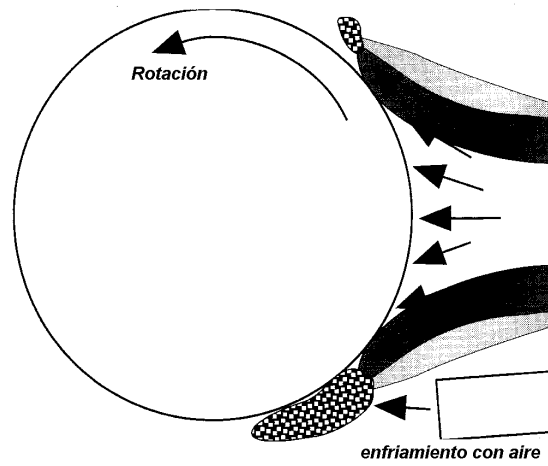
Los residuos, impurezas y óxidos periféricos se reducen cuando el rociado tiene lugar sobre áreas pequeñas. Este efecto se ilustra mediante la siguiente figura:



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 [15]

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 siguiente figura ilustra la acción descrita con anterioridad para una pieza en rotación.



4.4 RELACIÓN ENTRE EL GRADO DE FUSIÓN DE LAS PARTÍCULAS Y LA ESTRUCTURA DEL RECUBRIMIENTO [15]

Las partículas en el centro del patrón de 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 SUBSTRATO/RECUBRIMIENTO [15]

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 [15]

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 la dureza) establecidas por tratamientos térmicos son las que más fácilmente pueden ser alteradas.

4.4.3 OXIDACIÓN [15]

Las capas de recubrimientos 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 a 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 [15]

Los recubrimientos por proyección térmica se contraen en tanto 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 siguiente.



Los materiales del sustrato que tienen un alto coeficiente de expansión térmica que tienden a expandirse debido a las 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 líquidos 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 ANTORCHA Y EL SUSTRATO [15]

La proyección térmica es un proceso de línea de visión. En consecuencia, para obtener una deposición óptima de los recubrimientos, el área del sustrato debe ser normal (a 90°) en relación al chorro de material fundido. El objetivo fundamental del movimiento entre la antorcha y el sustrato es presentar el área objetivo en relación al chorro en un estado estable, consistente y de manera repetible, siempre manteniendo el mismo ángulo antorcha-sustrato, el standoff (distancia de rociado) 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 [15]

El movimiento relativo de la antorcha (patrón de rociado) y el área objetivo (el 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:

4.5.1 DISTANCIA BOQUILLA-SUSTRATO (STAND-OFF) [15]

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 [15]

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 [15]

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.

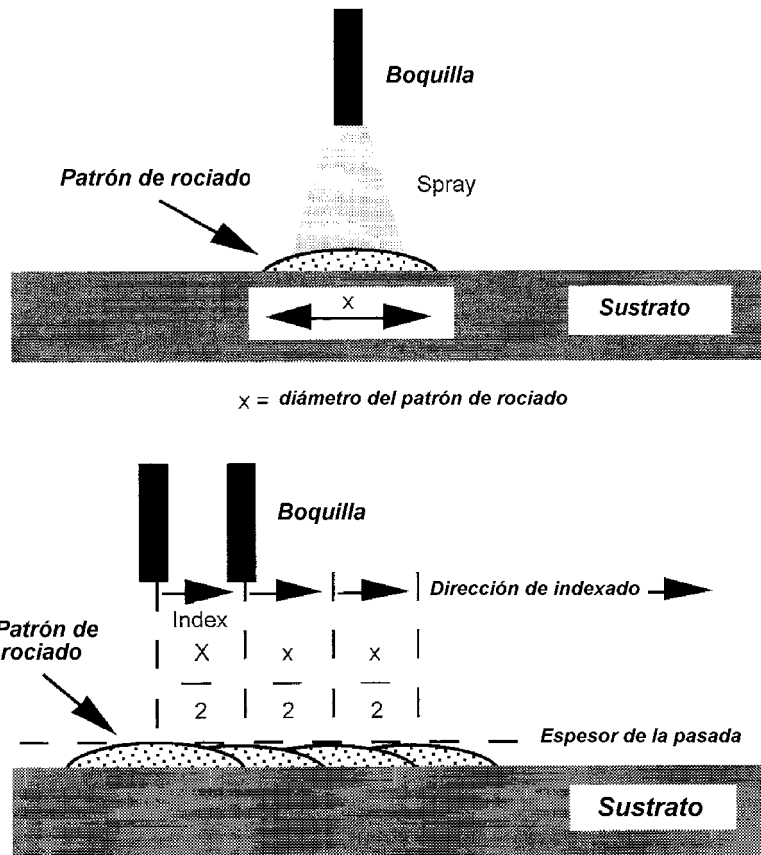
4.5.4 MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE LA PIEZA DE TRABAJO Y LA BOQUILLA [15]

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 capa 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 tamaño de las partículas de los polvos, 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 CONSIDERACIONES PARA EL PROCESAMIENTO CON HVOF [15]

El rociado con HVOF requiere algunas consideraciones especiales. La velocidad relativa entre la antorcha y la pieza de trabajo se encuentra típicamente en el rango de los 45 a los 122 m/min, mientras que los procesos con plasma requieren entre 23 y 76 m/min. La deposición de carburos mediante HVOF generalmente se restringe a $12\ \mu\text{m}$ por pasada. Estos lineamientos son necesarios para evitar que la pieza de trabajo sufra un sobrecalentamiento durante el rociado.

4.5.6 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE BARRIDO [15]



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. 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 traslaparán los patrones de rociado. En consecuencia, se producirá una capa uniforme.

Un ciclo a través de la superficie del sustrato produce una capa completa, y 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 la 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 anterior. 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.

El control de las variables de movimiento anteriormente mencionadas 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 programables y/o computarizados. 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. El control de la tasa de rociado es también importante. La tasa de alimentación de polvos es un parámetro clave que puede ser ajustado para influir en la tasa de deposición por pasada. Los sistemas de alimentación de polvos de hoy en día brindan un control retroalimentado de la tasa de rociado y su relación con los demás parámetros de proceso, permitiendo un monitoreo continuo para una corrección en tiempo real del flujo de polvos.

4.5.7 EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN [15]

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 de proceso de la 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 polvo inicial. Una baja eficiencia de deposición sugiere que una porción del polvo 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 DE EL CONSUMO ESTIMADO DE MATERIAL A PROYECTAR Y CÁLCULO DE LA TASA DE PRODUCCIÓN [23]

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 siguiente 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 ² /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/m²/100 micras

La tabla siguiente indica el peso necesario de alambre para recubrir un pie cuadrado de sustrato con un recubrimiento de 0.001” de espesor.

Material	Peso en onzas requeridas para depositar 0.001” en 1 ft ² 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

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

Ejemplo de cálculo:

Consideraciones:

- 400 ft² de superficie por recubrir
- 10% de sobrerrociado debido a barrenos y bordes
- Acero inoxidable rociado mediante arco eléctrico
- 0.1” de espesor del recubrimiento
- 70% de eficiencia de deposición
- tasa de rociado= 60 lbs/hr
- 80% del tiempo efectivo de rociado

Por lo tanto, el peso del material requerido es igual a:

$$\frac{(\text{Superficie por recubrir}) \times (\text{espesor deseado en milésimas de in}) \times (\text{factor de la tabla 1})}{(\text{Factor de corrección por sobrerrociado}) \times (\text{Eficiencia de deposición})}$$

Sustituyendo datos:

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

Alternativamente, usando la tabla 2

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

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

TIEMPO DE ROCIADO O TASA DE PRODUCCIÓN [23]

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

$$\text{TIEMPO DE ROCIADO} = \frac{\text{cantidad de material a rociar}}{(\text{Tasa de rociado}) \times (\% \text{ tiempo efectivo de rociado})}$$
$$\text{TIEMPO DE ROCIADO} = 46.3 \text{ horas}$$

4.6 SEGURIDAD DURANTE EL PROCESAMIENTO DE RECUBRIMIENTOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA. [12]

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 los 3 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 5 μm) y en ocasiones compuestos orgánicos volátiles como el tóxico benceno. Se debe utilizar un sistema de extracción de gases y un colector de polvos como el que se ilustra en la imagen siguiente.



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

- Ruido

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

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

El tiempo de exposición recomendada por OSHA (administración norteamericana para la salud y seguridad ocupacional) a distintos niveles de ruido se ilustra en la siguiente tabla:

Tiempo de exposición	dBA
8 hrs	90
4 hrs	95
2 hrs	100
1 hr	105
30 min	110
15 min	115

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



- 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 utilizar 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 flama se requiere menor nivel de protección (del número 6 al 8).

Se recomienda que la ropa empleada 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 riesgos potenciales de los cuales aún se tiene poco entendimiento y que tienen mucha discusión 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 dispositivos de HVOF alimentados con keroseno. Respecto a este último, los operadores reportan “sentir” la vibración (desde luego no la pueden escuchar) la cual les produce sensaciones desagradables en el estómago cuando se encuentran cerca de estos equipos.

CAPITULO 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.
- Relajación 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, vitrificación 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 [16]

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 μ 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 [16]



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 anterior, tales como los aceros al bajo carbono, aleaciones base cobre y aluminio. Los materiales más duros requieren comúnmente el uso de herramientas de carburo.

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 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 puede 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.

5.1.2 ESMERILADO [16]

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. 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 vitrificar el recubrimiento.
- Mantener los discos lo más frío posible
- Pueden ser usados discos de alúmina, carburo de silicio y diamante.

5.1.3 PULIDO [16]



Los recubrimientos previamente torneados o esmerilados pueden ser posteriormente pulidos para alcanzar altos acabados tipo espejo, por debajo de 1 a 2 μm . Dichos acabados son generalmente posibles sólo en recubrimientos muy densos. El pulido puede efectuarse mediante lapeado y rectificado, en la figura anterior izquierda se muestra un componente rectificado con piedra de diamante y a la derecha una pulida terminada.

5.2 DENSIFICACIÓN [16]

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 de las partículas
- Generar una barrera contra los productos corrosivos

5.3 FUSIÓN [16] y [24]

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 los óxidos 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 contienen 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. La tabla siguiente muestra las composiciones de algunas aleaciones autofundentes que se rocían y después se funden.

Composición, % en peso								
Designación de La aleación	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.

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, y 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.

- 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 [16] [22]

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.
- Proveen al recubrimiento de propiedades superficiales especiales tales como la antiadherencia y el desprendimiento superficial.

La siguiente tabla 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

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

1. Asegurarse 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 [16]

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 de compresión en la superficie del recubrimiento, lo cual mejora la resistencia a la fatiga del recubrimiento.

5.6 COMPRESIÓN ISOSTÁTICA EN CALIENTE [16]

La exposición simultánea de los recubrimientos a un ambiente de altas presiones hidrostáticas (del orden de los 10 Mpa 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 del 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 a los poros.

5.7 TRATAMIENTO TÉRMICO [16]

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 recristalización 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 recristalización 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 a baja presión, empleando gases inertes.
- Calentamiento por inducción.
- Procesamiento láser (vitrificación)

5.8 VITRIFICACIÓN CON LÁSER [16]

La vitrificación 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 concentrada 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 un reemplazo para algunos métodos convencionales de revestimiento duro (hardfacing) y con mayor importancia en la vitrificación 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 [16]

Una vez que un 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 [16] y [26]

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 incluyen:

- Resistencia a la adhesión en tensión

Usando la norma ASTM C 633 se preparan probetas cilíndricas recubiertas en una de sus caras circulares, las cuales posteriormente se unen a una barra del mismo diámetro de la probeta mediante un adhesivo cuya resistencia de adhesión es conocida, con lo que se infiere la resistencia de adhesión después de realizar un ensayo de tracción. Se necesita un mínimo de tres ensayos aunque cinco o más proveen mayor confiabilidad. Después de la falla del recubrimiento, las superficies de las probetas deben ser examinadas para determinar la ubicación de la falla. Lo anterior nos dará una idea de la naturaleza de la falla: falla adhesiva, esto es, falla en la intercara sustrato-recubrimiento, o falla en modo mixto, es decir, falla al interior del recubrimiento.

- Metalografía

Muestras de la intercara recubrimiento-sustrato se seccionan, se montan, se pulen y se estudian utilizando un microscopio óptico con ampliaciones de imagen. Del análisis de la sección transversal de la muestra pulida, se evalúa la densidad, el contenido de partículas sin fundir, el contenido de óxidos, la regularidad del espesor obtenido, el tamaño de grano (lo cual requiere un ataque químico previo) y la microdureza.

- Ensayo de doblado

Los recubrimientos son rociados sobre sustratos de 7.87 mm de espesor los cuales son doblados a 90° con un radio de 1". Después se examina el agrietamiento producido, la delaminación y el desprendimiento de porciones del recubrimiento, los cuales son indicadores de la integridad de la adhesión y de la ductilidad del recubrimiento

- Pruebas de choque térmico

Los recubrimientos cerámicos para barreras térmicas (TBC's), los cuales son usualmente rociados sobre un recubrimiento intermedio de adhesión, se someten a pruebas para determinar su resistencia al choque térmico mediante una exposiciones cíclicas a altas temperaturas y enfriamientos rápidos hasta su falla.

5.9.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS [16] y [26]

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 los hacen los ensayos destructivos de adhesión o metalografía.

Los ensayos no destructivos más comunes incluyen:

- Espesor

Cuando el tamaño del sustrato y su forma lo permitan, calibradores o micrómetros pueden ser usados para determinar el espesor. Sensores de corrientes parásitas, sensores ultrasónicos, capacitancia e instrumentos ópticos para la medición del espesor pueden ser usados en partes con geometrías más complejas.

- Textura superficial

Para determinar la textura superficial se emplean la inspección visual, los perfilómetros, y las mediciones ópticas y capacitivas. Actualmente también se emplean nuevas técnicas tales como el interferómetro de luz blanca y láser.

- Dureza

Hay discusión acerca de hasta que punto la prueba de dureza por indentación Rockwell es realmente no destructiva. Sin embargo, si se tiene un área en la pieza recubierta que no sea de trabajo y se le aplica una prueba de dureza, se puede coleccionar información muy valiosa. Los datos de microdureza (Vickers, Knoop) también son comúnmente medidos y registrados.

- Adherencia

Los ensayos de emisiones acústicas tienen la potencia para medir la integridad del recubrimiento, incluyendo la delaminación, la debilidad cohesiva y adhesiva. Las ondas ultrasónicas se desplazan y atenúan debido a las imperfecciones en la adhesión, siendo un buen indicador de la integridad de dicha adhesión.

CAPITULO 6. CONTROL DEL EQUIPO DEL PROCESO [11]

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

6.1 PARÁMETROS DEL PROCESO [11]

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

6.1.1 LAS VARIABLES DE MANIPULACIÓN [11]

- Distancia de alejamiento: 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.
- Incremento: 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° respecto a la superficie de la pieza.

6.1.2 LA VARIABLE DEL TIEMPO [11]

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.

6.1.3 LA TEMPERATURA [11]

Es controlada en parte por:

- Los mismos puntos anteriormente mencionados referentes al gas en el tiempo.
- La energía disponible actuando sobre el sistema.

Otras variables importantes. 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:

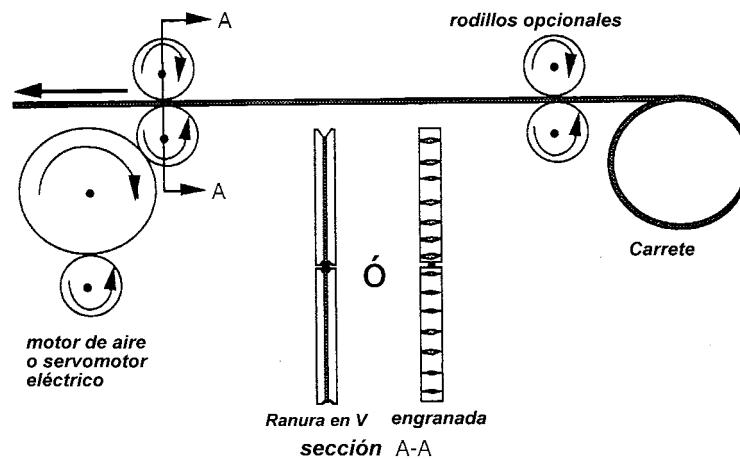
- Diámetro
- Rectitud
- Porosidad

Características importantes de la materia prima en polvo:

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

6.2 ALIMENTACIÓN DE MATERIAL [11] Y [17]

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 una figura donde se observa la sujeción por canal en V y engranada.



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.

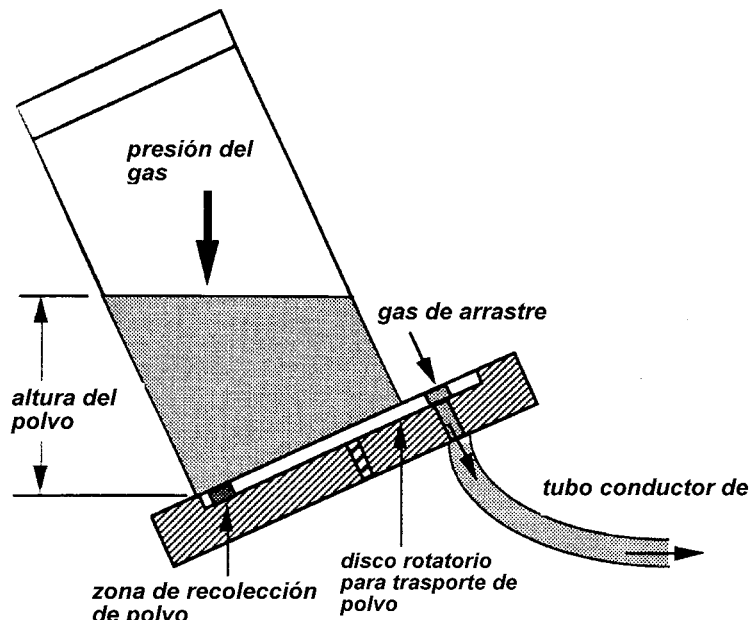
La fricción en los conductos de los alambres entre el nacimiento del alambre y el mecanismo de alimentación o entre el mecanismo de alimentación y la pistola produce un deslizamiento de los rodillos. Se recomiendan unos conductos lo más cortos posibles y la posibilidad de usar alambres roscados.

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 utilizan un mecanismo de desplazamiento positivo como tornillos, ruedas ranuradas ó 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.



La figura anterior ilustra un alimentador volumétrico.

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.

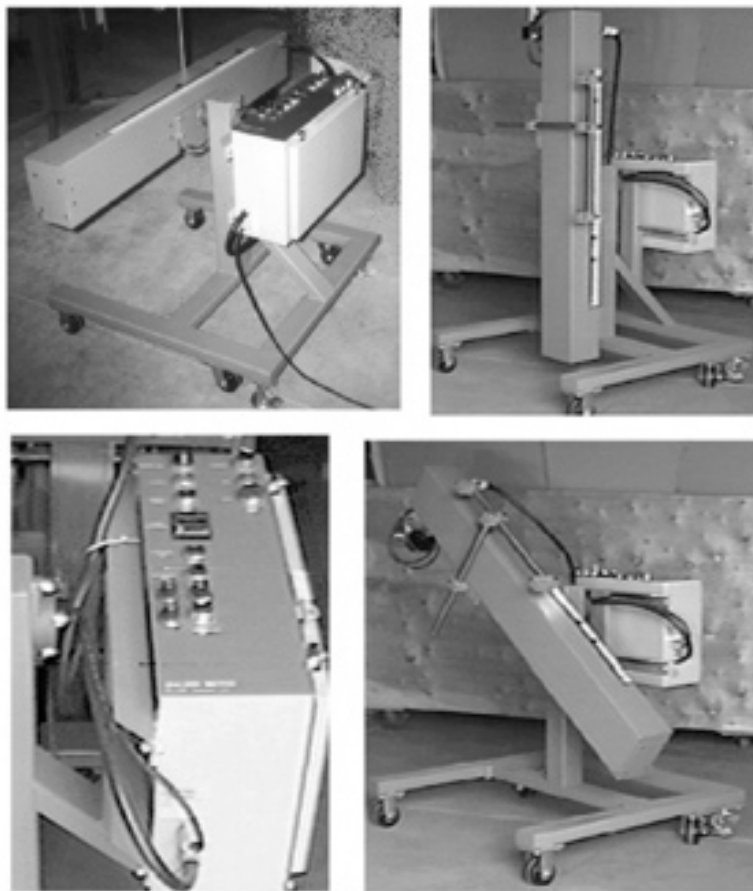
CAPITULO 7. EXPERIMENTACIÓN

EXPERIMENTACIÓN

Para dar validez a la hipótesis planteada al principio de este trabajo escrito y auxiliados con el banco de pruebas construido y que se muestra con detalle a continuación, se procedió a realizar una serie de experimentos representativos de algunas de las diferentes condiciones de trabajo con las que es posible operar el equipo de proyección térmica por flama.

7.1 BANCO DE PRUEBAS

En el mercado existen equipos auxiliares para la proyección térmica, los cuales son costosos debido a sus capacidades y al restringido mercado para los cuales están diseñados. La siguiente fotografía muestra un manipulador comercial de 1 eje [2]:

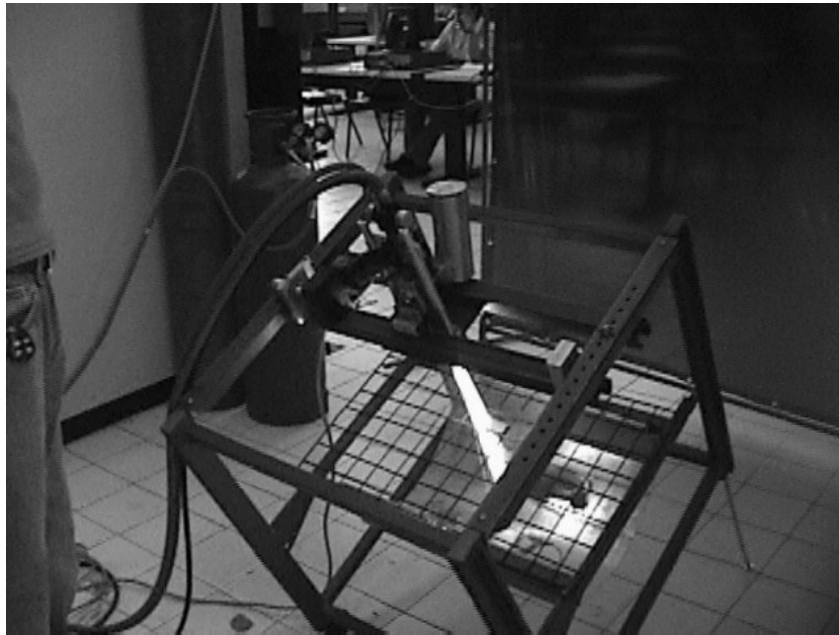


Por las razones anteriormente expuestas nos vimos en la necesidad de construir un banco de pruebas de costo mucho menor haciendo uso de los recursos disponibles, con el fin

de realizar nuestro estudio, el cual consiste en observar el efecto que tienen algunos parámetros importantes en la porosidad del recubrimiento antidesgaste de NiCrBSiFe sobre una superficie de acero de bajo carbono.

Para los fines de este estudio, fue suficiente la manipulación del equipo en un solo eje, pues no tiene propósitos de procesamiento industrial. Por otra parte, tal y como se ilustró anteriormente, el equipo de proyección térmica por flama maneja gastos másicos mucho menores en comparación a otros procesos. Por lo tanto, no fue necesario que el equipo se desplazara a altas velocidades.

La siguiente fotografía muestra el banco de pruebas que se construyó:



Previamente a la construcción del banco de pruebas tomamos en consideración lo siguiente:

- Diámetro experimental del patrón de rociado
- Geometría de la probeta empleada y su sujeción
- Medio para variar la distancia de proyección
- Soporte y movimiento del equipo de proyección térmica por flama
- Características del tornillo de bolas recirculantes empleado para desplazar al equipo de proyección térmica por flama
- Acoplamiento del motor y del tornillo de bolas recirculantes.

7.1.1 DIÁMETRO EXPERIMENTAL DEL PATRÓN DE ROCIADO

Para determinar el diámetro experimental del patrón de rociado respecto a la distancia de proyección se procedió de la siguiente manera:

Se mantuvo la pistola para proyección térmica por flama a una distancia fija de 9 pulgadas y se realizó el termorrociado durante 3 seg. y luego a 5 seg. Procediendo de la manera antes descrita, se varió la distancia de proyección a 10 y 11 pulgadas. Finalmente, se midió el diámetro de cada patrón de rociado.

Las siguientes fotografías ilustran al patrón de mayor diámetro y menor diámetro obtenidos experimentalmente.



Los diámetros obtenidos en cada caso fueron mayores a 1". A partir de lo anterior decidimos emplear probetas hechas con solera de 1" x ¼" de acero comercial de bajo carbono debido a:

- La alta disponibilidad de material en el mercado.
- El área de proyección es pequeña, por lo que puede ser recubierta en su totalidad mediante una sola pasada, es decir, no hay necesidad de indexar el equipo en otro eje.
- El tiempo y el esfuerzo para granallar y limpiar una probeta de 1" de ancho son menores en comparación con preparar superficies mayores.
- Una probeta de ¼" x 1" puede ser fácilmente montada en resina para fines de estudios metalográficos sin necesidad ejecutar más de un corte:

7.1.2 GEOMETRÍA DE LA PROBETA EMPLEADA Y SU SUJECIÓN



Como se mostró anteriormente, el ancho de la probeta lo determinó el diámetro del patrón de rociado. Respecto a la determinación de la longitud de la probeta, se encontró que primero era necesario seleccionar el sistema de sujeción de la pieza. La sujeción de la pieza debe hacerse de tal manera que la superficie a recubrir quede totalmente expuesta al chorro, por lo tanto, el sistema de sujeción no debe crear interferencias. Es así que se decidió emplear una rejilla comercial (ver plano en apéndice) formada por redondos de acero de $3/16''$ x $1/8''$, y hacer descansar a la probeta entre dos redondos consecutivos. Como la probeta tiene un espesor de $1/4''$, sobresale $1/16''$ respecto al redondo de $3/16''$, por lo que su superficie queda completamente expuesta y libre de interferencias. Lo dicho anteriormente se muestra en la anterior y siguiente fotografía.



Dicha rejilla tiene una apertura de $2''$ x $2''$; por lo tanto decidimos cortar a las probetas a una longitud de $2 \frac{1}{2}''$ para su fácil acomodo y poco desperdicio de material. En un plano anexo se especifican la geometría y el acabado superficial de dichas probetas.

7.1.3 MEDIO PARA VARIAR LA DISTANCIA DE PROYECCIÓN

Para efectos de variar la distancia de proyección, seleccionamos el sistema ménsula-cremallera mostrado en la siguiente figura, el cual se emplea en la manufactura de mobiliario para comercios y almacenes. Dicho sistema sirve para sustentar objetos con la facilidad de variar la distancia entre niveles.



Dicho sistema consiste de un elemento ranurado (cremallera) en cuyas ranuras se apoya el elemento llamado ménsula. Dicha ménsula se apoya en cuando menos 2 ranuras con objeto de limitar su movimiento a un grado de libertad (para asentarse a la ranura).

Aprovechar esa capacidad de variación en la distancia, además de prescindir de cualquier mecanismo actuador para llevarla a cabo, fue la razón por la que se utilizó ese sistema para el banco de pruebas.

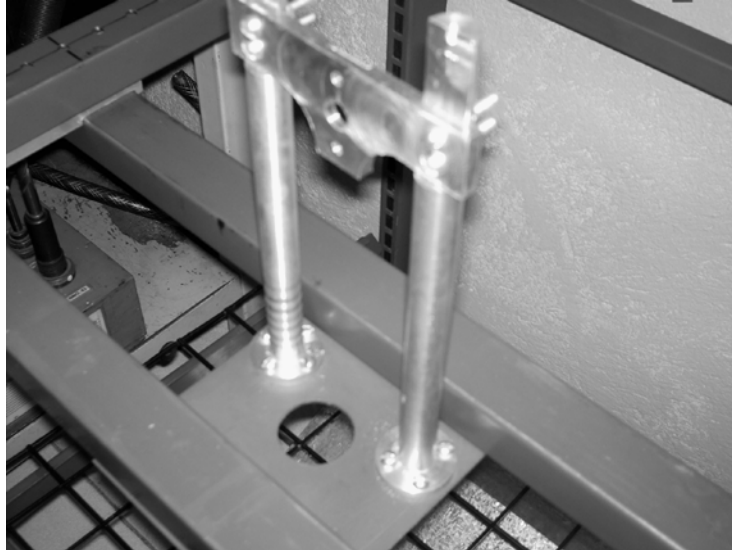
Por otra parte, las distancias de proyección son determinadas en pulgadas según la tabla de parámetros proporcionada por el fabricante y se amplió el rango una pulgada arriba del límite descrito pues se observó que en la determinación del diámetro del patrón de rociado se cumplía de buena manera con el ancho de la probeta.

En el mobiliario para comercio se emplean pasos estándar entre ranuras establecidos en pulgadas. Uno de los más comunes es el paso de 1". Por lo tanto, el emplear tubos ranurados comerciales con ese paso se ajustó perfectamente a este estudio.

Para este estudio construimos un entrepaño hecho con 2 ménsulas de 3 posiciones de 23" de largo unidas mediante tubos cuadrados de 1" x 1". El largo de esos tubos lo determinó el largo del tornillo de bolas recirculantes más el espacio para el acomodo del motor, las poleas y el control del motor. La rejilla para la sujeción de las probetas se montó sobre dicho entrepaño y se añadió una lámina galvanizada para recuperar polvos y detener a las partículas fundidas en su trayectoria (ver planos en apéndice).

7.1.4 SOPORTE Y MOVIMIENTO DEL EQUIPO DE PROYECCIÓN TÉRMICA

Para dar soporte y movimiento al equipo de proyección, se utilizó un sistema comercial riel-carretilla empleado para desplazar puertas de gran tamaño y peso.

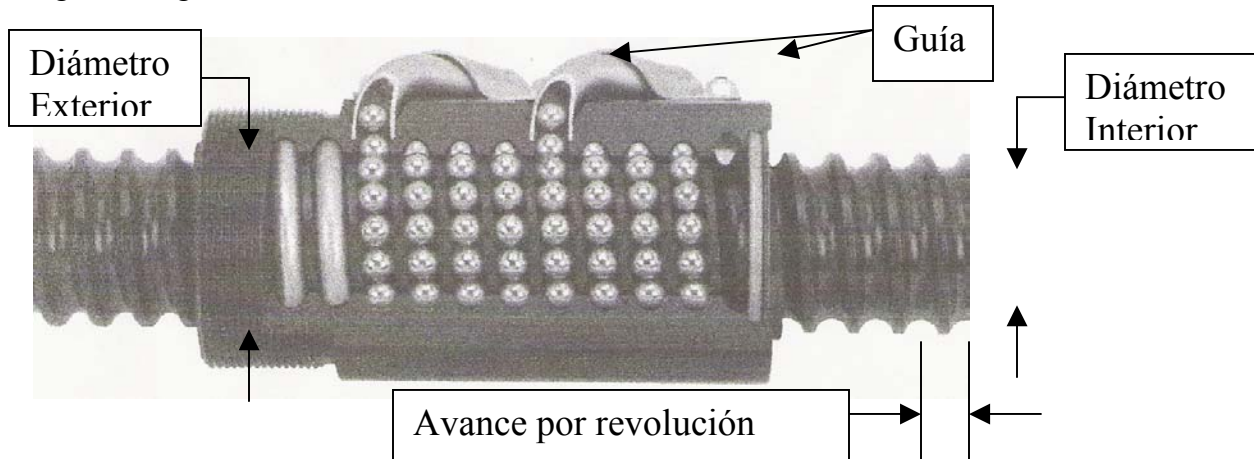


El soporte de la pistola está formado por un par de postes de aluminio torneados a la medida y unidos mediante un elemento también de aluminio diseñado para fijar la pistola mediante tornillos. Dichas piezas se manufacturaron en aluminio para aligerar la carga axial sobre el tornillo de bolas recirculantes, el ensamble anterior se une a una lámina con un barreno mayor en diámetro a la boquilla de la pistola, la cual a su vez es soportada en sus extremos por carretillas de cuatro rodamientos, las cuales permiten que este ensamble se deslice con suavidad a través de 2 rieles paralelos. Dicho ensamble es unido al tornillo sinfín mediante una lámina con dos ranuras doblada en forma de L. La lámina se acopla al sinfín mediante tornillos. Esto se ve en la figura anterior (ver planos en apéndice).

El ensamble anterior se desliza por otro par de rieles paralelos y perpendiculares a los rieles del ensamble anterior. El nuevo ensamble formado se atornilla a la estructura que conforma el banco de pruebas. Con esto conseguimos tener 2 ejes de desplazamiento: uno motorizado y otro manual. El segundo eje es necesario pues durante algunas pruebas se observó que el equipo no rocía en dirección al piso debido a que la alimentación de polvos se realiza por gravedad. Una inclinación entre 30° y 45° respecto a la horizontal evita este problema. Se corrigió este problema mediante el uso de espárragos atornillados en 2 patas del banco para inclinarlo. En las otras dos patas se atornilló ruedas comerciales con freno para facilitar la inclinación del banco y para desplazarlo con mayor facilidad pues su peso es significativo. El papel del segundo eje es desplazar al primer eje de tal modo que la nueva posición del equipo mantenga la estabilidad del sistema, es decir no se produzca el volteo del banco (ver planos anexos).

CARACTERÍSTICAS DEL TORNILLO DE BOLAS RECIRCULANTES EMPLEADO PARA DESPLAZAR AL EQUIPO DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA.

Cuando el movimiento de rotación ha de transformarse en lineal con gran rendimiento, es decir, convertir el torque de un motor a empuje lineal y una velocidad de rotación constante en una velocidad lineal también constante con muy altas eficiencias, se recomienda el uso de un tornillo de bolas recirculantes como el que se muestra en la siguiente figura.



El medio de enlace entre el tornillo y la tuerca se compone de varios circuitos cerrados llenos de bolas (balines). Cuando el tornillo gira respecto a la tuerca, estas bolas ruedan alrededor de circuitos helicoidales. Se emplean caminos guías para desviarlas del canal del tornillo, recircularlas diagonalmente por el exterior de la tuerca y volverlas a introducir en el canal. Por lo tanto, no existe contacto físico directo entre el tornillo y la tuerca por lo que la fricción sólo se suscita entre las bolas con el tornillo y las bolas con la tuerca. Dicha fricción es mínima. Esta es la razón por la que la eficiencia para convertir el torque en empuje y la velocidad angular en velocidad lineal excede el 90%.

Los tamaños típicos de los tornillos van desde un tornillo que tiene un diámetro exterior de 3/8", un paso o avance por revolución de 1/8" y bolas de 1/16" de diámetro, a tornillos que tienen un diámetro exterior de 3", un paso de 0.66" y bolas de 1/2" de diámetro.

Los tornillos se tratan térmicamente hasta alcanzar una dureza mínima de 56 Rc y se expenden de cualquier longitud. Las tuercas pueden conseguirse de cualquier tamaño y forma para poderlas adaptar a la mayoría de las aplicaciones. Para la realización de un proyecto se debe consultar la literatura del fabricante. [28]

Para nuestros fines, se empleó un tornillo de bolas recirculantes usado, el cual perdió precisión de posicionamiento. Sin embargo, su capacidad de desarrollar una velocidad constante la mantiene, razón por la cual se reutilizó.

Por otra parte, en la literatura de los fabricantes de tornillos de bolas recirculantes se vio que se carecía de un criterio de selección fundamental: La velocidad lineal deseada para el desplazamiento de la carga axial del tornillo, la cual es objeto de otro estudio.

Por lo tanto, además de carecer de las especificaciones del fabricante del tornillo de bolas recirculantes que se usó, nos limitamos a tomar medida de algunas características de éste:

- Diámetro exterior ~ 3/8"
- Diámetro Interior ~ 0.3"
- Longitud ~ 18.5"
- Avance por revolución (paso) ~ 1/8"

Se desconoce si haya alguna norma al respecto, pero en varios catálogos comerciales estas medidas corresponden al primer tornillo de las distintas series (es decir , el de menor tamaño).

A continuación se muestran los parámetros más importantes que se deben calcular para realizar una correcta selección de un tornillo de bolas recirculantes, y para este caso, predecir el comportamiento del sistema al variarse algunos parámetros. Dicha información fue tomada de catálogos.

- Carga dinámica aplicada (P)

Cada aplicación única necesita estudiarse para tomar en cuenta y cuantificar cada uno de las componentes de las fuerzas que actúan sobre el tornillo. Dichas componentes incluyen al peso de la carga por mover, el peso del mecanismo deslizante, componentes de cualquier fuerza que se resista directamente al movimiento lineal generado por el tornillo (por ejemplo la fuerza ejercida por herramientas de corte) y cualquier otro componente de fuerzas aplicadas.

$$P = W * \mu + F_p$$

P: Carga dinámica aplicada (lbs)

W: Peso de la carga por deslizar (lbs)

F_p: Componentes de las fuerzas que actúan en contra del avance del mecanismo deslizante

μ: Coeficiente de fricción:

Caso	μ
Acero sobre acero	~ 0.58
Acero sobre acero engrasado	~ 0.15
Aluminio sobre acero	~ 0.45
Empalmes de cola de milano	~ 0.2
Uso de rodamientos	< 0.001

- Velocidad crítica (Cs)

La velocidad crítica es aquella velocidad lineal teórica (pulgadas/minuto) que excita la frecuencia natural del tornillo. Mientras la velocidad lineal se aproxime a la velocidad crítica, el tornillo comenzará a entrar en resonancia, lo cual conlleva a la generación de vibraciones indeseablemente excesivas. Se recomienda desarrollar una velocidad lineal máxima al 80% de la velocidad crítica calculada.

$$Cs = (Fe * 4.76 \times 10^6 * D_{int} * S_L * Fs) / L^2$$

Cs: Velocidad crítica (pulgadas/min)

D_{int} : Diámetro interior del tornillo (pulgadas)

S_L : Paso del tornillo (pulgadas)

L: Distancia entre los rodamientos de apoyo (pulgadas)

Fs: Factor de seguridad (0.8 recomendado)

Fe: Factor debido a la configuración de los rodamientos

<u>Fe</u>	<u>Configuración</u>
-----------	----------------------

<u>Figura</u>	
---------------	--

0.36	Con un extremo libre
------	----------------------

a	
---	--

1	Con apoyos simples en los extremos
---	------------------------------------

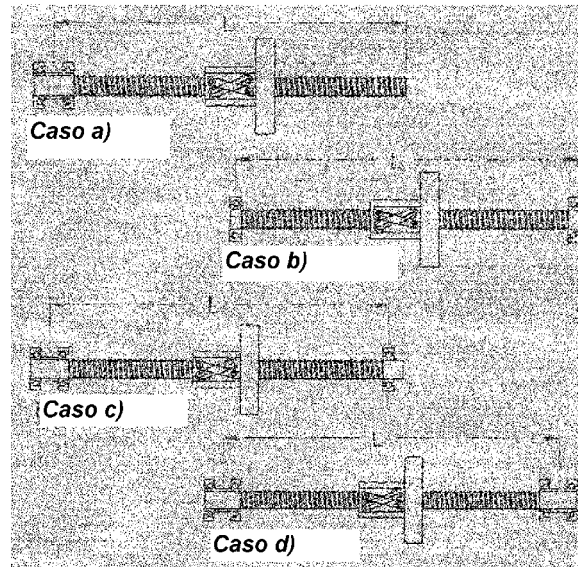
b	
---	--

1.47	Con un apoyo simple en un extremo y con apoyos espaciados en el otro extremo
------	--

c	
---	--

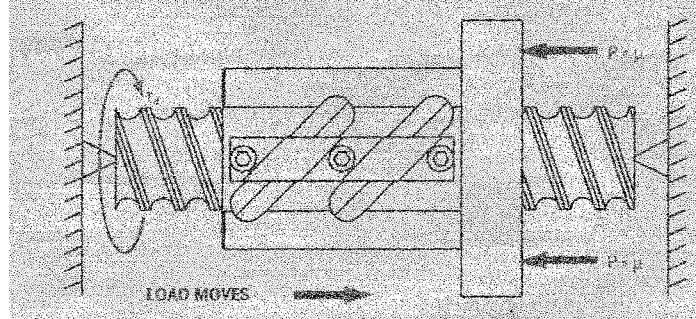
2.23	Con apoyos espaciados en ambos extremos
------	---

d	
---	--



- Torque aplicado (Td)

Es la mínima cantidad de torque requerido por el tornillo de bolas recirculantes para mover una carga dada. Este torque no toma en cuenta ninguna carga inercial requerida para conseguir aceleración como se muestra en la siguiente figura.



$$T_d = [S_L * P] / [2 \pi * \eta_{\text{tornillo}}]$$

Td: Torque aplicado (lb-in)
 P: Carga dinámica aplicada (lb)
 S_L: Paso del tornillo (pulgadas)
 η_{tornillo}: Eficiencia del tornillo de bolas recirculantes (0.9 nominal)

- Requerimientos de potencia

Las siguientes fórmulas nos muestran cómo calcular la velocidad y la potencia del motor requerido actuar en el tornillo de bolas recirculantes:

$$\text{RPM} = [\text{velocidad lineal de la carga (in/min)}] / [\text{paso o avance por revolución (in)}]$$

$$\text{H.P.} = [\text{RPM} * T_d] / 63,000$$

COMPORTAMIENTO GENERAL DE UN TORNILLO DE BOLAS RECIRCULANTES COMO EFECTO DE CAMBIOS EN ALGUNOS DE SUS PARÁMETROS:

INCREMENTO EN EL PARÁMETRO --- > EFECTOS

Longitud del tornillo: -disminución de la velocidad crítica

Diámetro exterior del tornillo: -incremento en la velocidad crítica
 -incremento en la rigidez (resistencia del tornillo)

Paso: -incremento en la capacidad de carga, -incremento en el torque aplicado
 -aumento en el diámetro de las bolas, -disminución en la velocidad angular,
 -disminución en la precisión de posicionamiento

Velocidad angular: -disminución de la velocidad crítica

Rigidez de montaje: -se incrementan tanto la velocidad crítica como la rigidez del sistema

Carga: -disminuye su vida útil.

CÁLCULOS RELATIVOS AL BANCO DE PRUEBAS

1.- Velocidad crítica del tornillo de bolas recirculantes:

$$C_s = (F_e * 4.76 \times 10^6 * D_{int} * S_L * F_s) / L^2$$

$F_e = 1$ pues el tornillo se encuentra apoyado en sus extremos por rodamientos simples

Nota: No se realizó ninguna selección de rodamientos pues el tornillo de bolas recirculantes ya los incluía. Las dimensiones generales de los rodamientos son: Diámetro exterior = $\frac{3}{4}$ ", diámetro interior = $\frac{3}{8}$ ", espesor = $\frac{1}{4}$ ".

$$C_s = (1 * 4.76 \times 10^6 * 0.3 * 0.125 * 0.8) / (18.5)^2$$

$$C_s = 417.23 \text{ [in/min]} = 1059.79 \text{ [cm/min]}$$

Por otra parte, la velocidad angular necesaria para alcanzar ese límite esta dada por:

$$\text{RPM} = [\text{velocidad lineal de la carga (in/min)}] / [\text{paso o avance por revolución (in)}]$$

$$\text{RPM} = [417.23 \text{ (in/min)}] / [0.125 \text{ (in)}]$$

$$\text{RPM} = 3338$$

2.- Carga axial máxima que puede mover el motor que se empleó:

Se ocupó un motorreductor de 12 V, con un torque nominal de 150 mNm, con velocidad nominal con carga de 121 rpm, velocidad nominal sin carga de 160 rpm y una corriente de alimentación de 500 mA. A partir de dicha corriente elegimos ese motorreductor pues con un eliminador comercial de baterías, el cual genera 500 mA como corriente máxima, pudimos alimentarlo y controlarlo sin necesidad de realizar un circuito que generara mayor corriente.

Por lo tanto, a partir de la expresión

$$T_d = [S_L * P] / [2 \pi * \eta_{\text{tornillo}}]$$

$$\text{Despejamos a } P = T_d * [2 \pi * \eta_{\text{tornillo}}] / S_L$$

$$T_d = (150 \times 10^{-3} \text{ Nm})(0.0057 \text{ lb-in} / 1 \text{ Nm}) = 0.0009 \text{ lb-in}$$

$$\text{Por lo tanto: } P = 0.0009 * [2 \pi * 0.9] / 0.125 = 0.0387 \text{ lb.}$$

$$\text{Por lo tanto } W = P / \mu = 0.0051 / 0.001 = 38.679 \text{ lb} \sim 17.5 \text{ kg}$$

En el cálculo usamos $\mu = 0.001$ pues la carga se desplaza apoyada en rodamientos.

En conclusión, el peso máximo (el peso de la carga a impulsar más el peso del soporte) que puede mover el motorreductor empleado es de 17.5 kg

3.- Torque mínimo para mover la carga axial en nuestro banco de pruebas

La carga total que actúa sobre el tornillo de bolas recirculantes está conformada por:

- Peso del soporte de la pistola de termorrociado: 1.7 kg
- Peso de la pistola para termorrociado 1.86 kg
- Peso del material a proyectar más el depósito 1.9 kg

Total = W = 5.46 kg ~ 12.0372 lb

La carga axial esta dada por la expresión:

$$P = W * \mu + F_p$$

En donde $F_p = 0$ pues no hay fuerzas que se opongan al movimiento de la pistola, y $\mu = 0.001$ pues la carga se desliza sobre rodamientos

Por lo tanto: $P = (12.0372) * 0.001 = 0.012037 \text{ lb}$

El torque mínimo necesario para despalazar dicha carga axial está dado por la expresión:

$$T_d = [S_L * P] / [2 \pi * \eta_{\text{tornillo}}]$$

$$T_d = [0.125 * 0.01237] / [2 \pi * 0.9]$$

$$T_d = 0.000266 \text{ lb-in} \sim \underline{46.7 \text{ mNm}}$$

En conclusión, el motorreductor empleado tiene un torque nominal de 150 mNm el cual es más de 3 veces mayor al torque mínimo necesario calculado con anterioridad. Esto explica el porqué el banco de pruebas funcionó sin problemas.

7.1.5 ACOPLAMIENTO DEL MOTOR AL TORNILLO DE BOLAS RECIRCULANTES



Finalmente, se acopló el motorreductor y el tornillo de bolas recirculantes mediante dos poleas y una banda (ver fotografía superior) debido principalmente a que con esto se solucionan problemas de alineamiento y a que en caso de atascarse el tornillo por exceder los límites del movimiento de la pistola de termorrociado, la banda se deslizará en las poleas con lo que se previenen daños al motorreductor.

La polea conducida fue sobrepuesta a una polea dentada que ya incluía el tornillo de bolas recirculantes empleado, la cual no fue posible desmontar pues estaba soldada a dicho tornillo. Por lo tanto, se fabricó una polea cuyo diámetro mínimo es de 20 mm puesto que los tornillos de fijación a la polea existente limitan el corte de la polea a diámetros inferiores a 20 mm. Por otra parte, no se pudo manufacturar una polea con un diámetro mucho mayor a 20 mm pues la barra de aluminio con la que se fabricó tiene un diámetro de $\frac{1}{2}$ " (25.4 mm). Por lo tanto $D_{\text{conducida}} = 20 \text{ mm}$.

Respecto a la polea conductora, se empleó una barra de aluminio de $\frac{1}{2}$ " de diámetro pues en su momento fue la única materia prima disponible. Su diámetro en primera instancia fue de 20 mm para tratar de mantener una relación de transmisión lo más cercana a 1. Alcanzar una relación de transmisión igual a 1 en una transmisión por banda no es posible pues siempre habrá deslizamiento entre las superficies de contacto entre la banda y la polea. Dicho deslizamiento aumenta conforme mayor sea la velocidad de rotación en las poleas.

La velocidad de rotación nominal del motorreductor con carga es de 121 rpm, velocidad relativamente baja en relación a las velocidades comunes de operación de las bandas. Por lo tanto, los efectos del deslizamiento los consideramos despreciables. Sin embargo, por efecto de la rotación en la banda se generó una fuerza normal al plano de rotación de la banda la cual provoca que ésta se salga de su posición. Para contrarrestar este efecto, decidimos reducir el diámetro de la polea de tal forma que las dimensiones del corte transversal de la banda (3.5x 7 mm) penetren en su totalidad en el ranurado hecho y las paredes de dicha ranura contengan a la fuerza anteriormente descrita. Por lo tanto, la

polea conductora modificada tiene un diámetro de 13mm ($D_{\text{conductora}}$). Para consultar las especificaciones de las poleas descritas remitirse a los planos anexos.

Por otra parte, la mayor velocidad lineal promedio generada (la cual fue la velocidad con la que se realizaron los experimentos) fue de 25.86 cm / min. Por lo tanto, calculamos la velocidad de rotación a partir de la expresión:

$$\text{RPM} = [\text{velocidad lineal de la carga}] / [\text{paso o avance por revolución}]$$

$$\text{RPM} = [25.86 \text{ (cm/min)}] / [0.3175 \text{ (cm)}] = 81.45 \text{ rpm}$$

81.45 rpm ($\omega_{\text{conducida}}$) es la velocidad rotacional en la polea conducida. La velocidad nominal del motorreductor con carga que se genera en la polea conductora es 121 rpm ($\omega_{\text{conductora teórica}}$).

Si consideramos que la velocidad lineal es igual en los puntos de contacto de la banda con la polea conductora como en la polea conducida (despreciando el efecto del deslizamiento) podemos suponer que:

$$V_{\text{conductora}} = V_{\text{conducida}}$$

$$\text{Por lo tanto: } D_{\text{conductora}} \omega_{\text{conductora teórica}} = D_{\text{conducida}} \omega_{\text{conducida}}$$

$$\text{Lo que nos lleva a: } D_{\text{conductora}} / D_{\text{conducida}} = \omega_{\text{conducida}} / \omega_{\text{conductora teórica}}$$

$$\text{Esto es } D_{\text{conductora}} / D_{\text{conducida}} = 13 / 20 = 0.65$$

$$\omega_{\text{conducida}} / \omega_{\text{conductora teórica}} = 81.45 / 121 = 0.67314$$

El error teórico debido al deslizamiento de la polea es: $100 * (0.67314 - 0.65) / 0.65 = 3.56 \%$

Dicho error es mínimo, es decir no afecta significativamente a la velocidad lineal desarrollada. Dicho error también pudo deberse a que el valor nominal de la velocidad con carga del motorreductor es menor al valor de la velocidad con la carga aplicada por la banda ($\omega_{\text{conductora real}}$) la cual es igual a 130 rpm medida con tacómetro. Suponiendo que la carga nominal es mayor a la carga efectuada por la banda, lo cual explica esta diferencia. Por otra parte la velocidad nominal del motor sin carga es de 160 rpm.

$$\text{Por lo tanto, } \omega_{\text{conducida}} / \omega_{\text{conductora real}} = 81.45 / 130 = 0.626538$$

El error real debido al deslizamiento de la polea es: $100 * (0.65 - 0.67314) / 0.65 = 3.6094 \%$

Nótese que dichos errores son casi iguales.

A continuación se muestra una tabla que muestra las características de funcionamiento del banco de pruebas.

Longitud de barrido del equipo	14 “
Distancia de proyección	1” a 20”
Velocidad superficial máxima desarrollada por el equipo	26 cm / min
Velocidad crítica superficial teórica recomendada para el tornillo de bolas recirculantes	<1000 cm / min
Carga axial máxima (incluye al mecanismo)	17.5 kg
Carga máxima recomendada (no incluye al mecanismo)	15 kg
Corriente máx. entregada por el eliminador	500 mA
Voltaje máx. entregado por el eliminados	12 V
Torque mínimo de operación	50 mNm
Torque nominal del motorreductor	150 mNm
Corriente nominal del motorreductor	500 mA
Velocidad nominal del motorreductor con carga	121 rpm
Velocidad nominal del motorreductor sin carga	160 rpm
Velocidad máxima recomendada en el tornillo de bolas recirculantes	3000 rpm
Relación de transmisión entre poleas	0.65 +/- 3%
Diámetro exterior del tornillo de bolas recirculantes	3/8”
Diámetro interior del tornillo de bolas recirculantes	0.33”
Avance por revolución (paso) del tornillo de bolas recirculantes	1/8”

7.1.6 | CONSIDERACIONES

Después de considerar conveniente establecer el valor de tres variables determinantes en el proceso: rugosidad del sustrato, el ángulo de proyección y la velocidad de rociado; y de utilizar el único polvo disponible en la Facultad para aplicaciones de desgaste, los experimentos consistieron en variar la distancia entre la boquilla de la pistola y la pieza de trabajo, la apertura de la válvula de la pistola que permite la variación del flujo de los polvos hacia la flama, y el espesor del recubrimiento depositado mediante la repetición de la operación de rociado sobre la misma pieza de trabajo.

Las consideraciones importantes previas, durante y posteriores a la experimentación fueron que:

- Debido a la poca variación de la rugosidad entre las diversas piezas de trabajo se consideró que en promedio todas las piezas tenían un valor de rugosidad prácticamente igual.
- Ya que todas las piezas de trabajo fueron granalladas el mismo día y posteriormente fueron sometidas a un proceso de limpieza con acetona, se considero que no hubo variación respecto a la posibilidad de presencia de óxidos e impurezas superficiales de las mismas.
- Ya que todas las piezas fueron proyectadas el mismo día se considera que las condiciones ambientales como humedad y temperatura no representaron cambios significativos previos a la proyección de una pieza respecto a otra; así mismo el proceso de enfriamiento de la pieza de trabajo.
- Debido a que el precalentamiento se realizó con las mismas condiciones de flama y tiempo de exposición para cada una de las piezas de trabajo, se considero que la temperatura previa a la proyección del recubrimiento era prácticamente la misma.
- Debido a que los experimentos se realizaron con la operación continua del equipo de proyección térmica, se considera que las características de la flama fueron las mismas ya que no se vario la relación del oxígeno-acetileno-aire comprimido.
- Debido a que los experimentos fueron realizados con polvos procedentes del mismo lote de producción, se considera que el tamaño de las partículas es prácticamente el mismo para cada pieza proyectada.

A continuación se presenta una tabla que contiene las variaciones entre los parámetros de las probetas.

7.1.7 TABLA DE EXPERIMENTOS

Numero de Probeta	Distancia de Proyección[in]	Apertura de la válvula	Numero de pasadas
1	9	16	1
2	9	16	2
3	9	17	1
4	9	17	2
5	9	18	1
6	9	18	2
7	10	16	1
8	10	16	2
9	10	17	1
10	10	17	2
11	10	18	1
12	10	18	2
13	11	16	1
14	11	16	2
15	11	17	1
16	11	17	2
17	11	18	1
18	11	18	2

La rugosidad de las probetas fue: 8.725[μm]

El ángulo de proyección fue: 90°

La velocidad de rociado fue: 25.86 [cm/min]

Polvo para el recubrimiento: 12C (Metco)

La siguiente tabla muestra el gasto de polvo correspondiente a la posición de la válvula.

Abertura de la válvula	Equivalencia en kg/hr
16	3.185
17	3.55
18	4.1

La siguiente tabla muestra las características del polvo empleado en los experimentos.

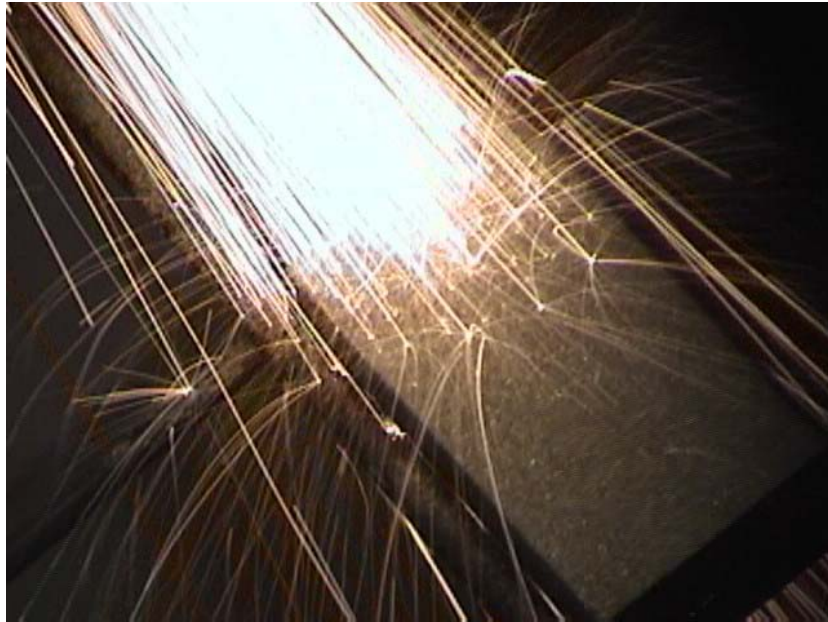
Nomenclatura	Composición	Dureza	Espesor Max.	Temperatura Límite (°C)	Rugosidad ($\mu\text{in Ra}$)	Tamaño partícula μm	Esfuerzo Adhesión
Metco 12C	Ni, 10 % Cr, 3% B, 3% Si 3%Fe	35-40 HRC	0.060"	1050	16	-125 +45 μm	40Mpsi

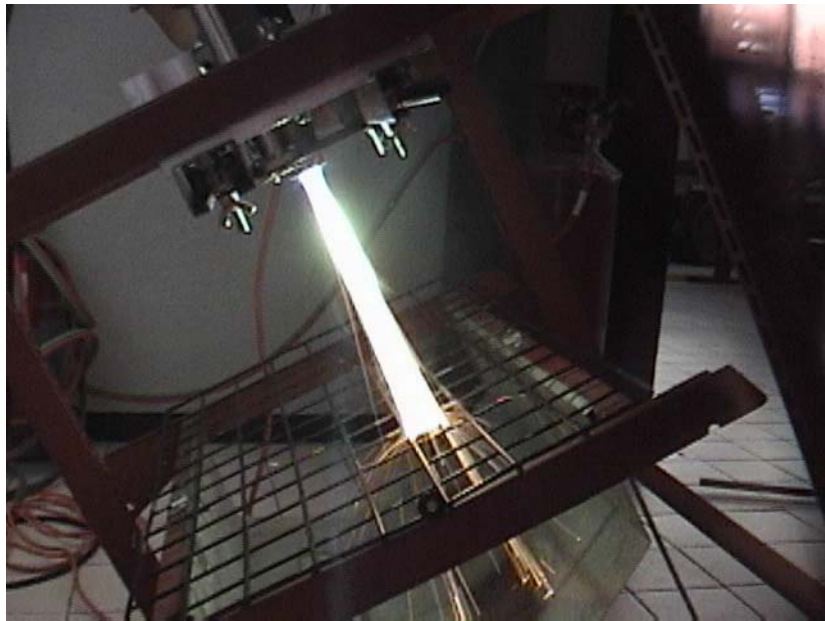
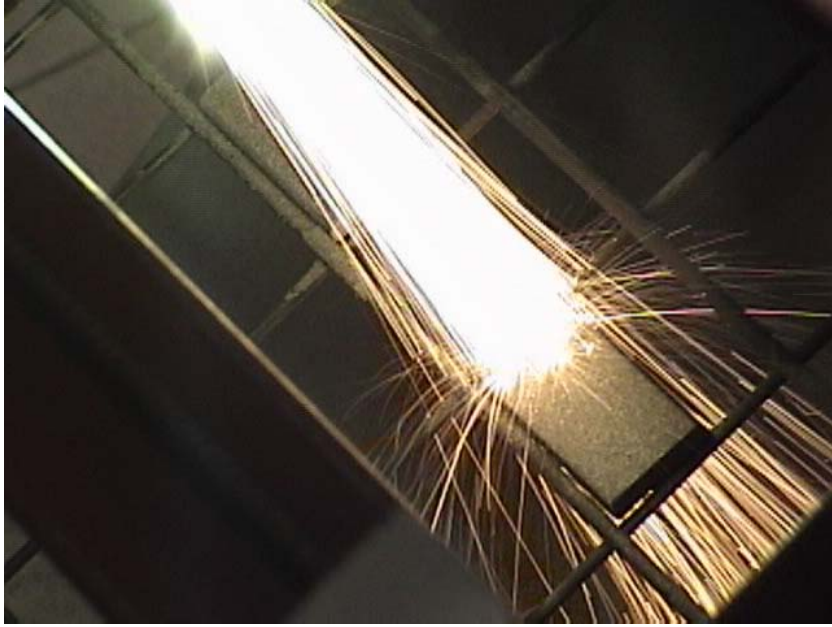
Los experimentos anteriormente descritos se realizaron por duplicado, por lo que se cuenta con dos probetas con los mismos parámetros.

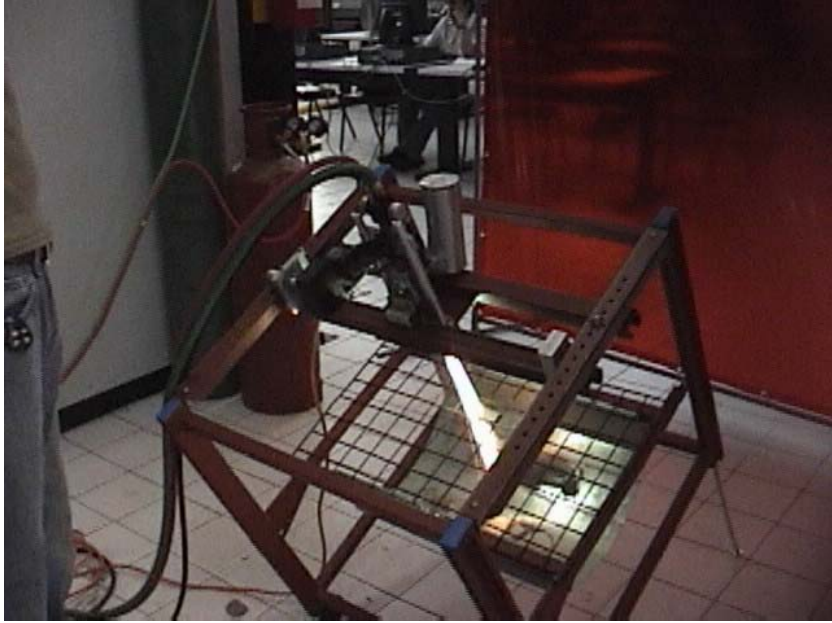
El diámetro del patrón de rociado, proyectado por el equipo utilizado a una distancia de 11 pulgadas, se muestra en la siguiente tabla con la finalidad de orientar al usuario para el desplazamiento transversal de la pistola aconsejando un traslape del 50% del diámetro del patrón de rociado:

Apertura de la válvula	Diámetro de la huella [mm]	Tiempo de proyección [s]	Espesor max. [mm]
16	37.16	5	1.47
16	31.65	3	1.12
17	26	5	1.86
17	23.23	3	1.2
18	28	5	2.14
18	25.5	3	1.25

A continuación se muestran algunas fotografías del desarrollo experimental:



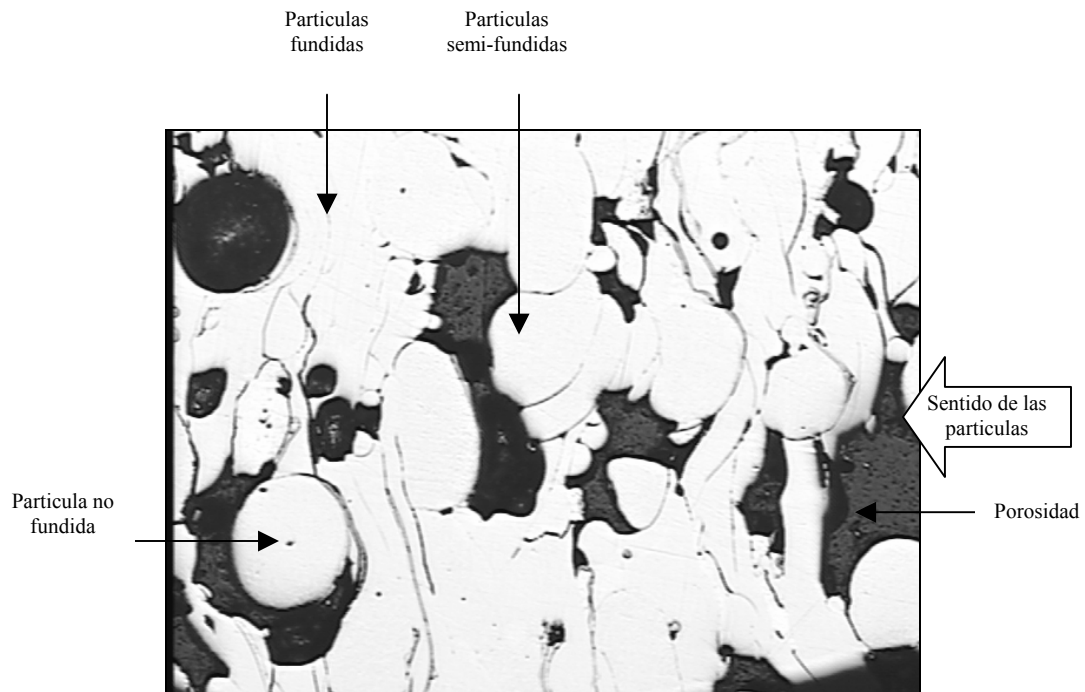




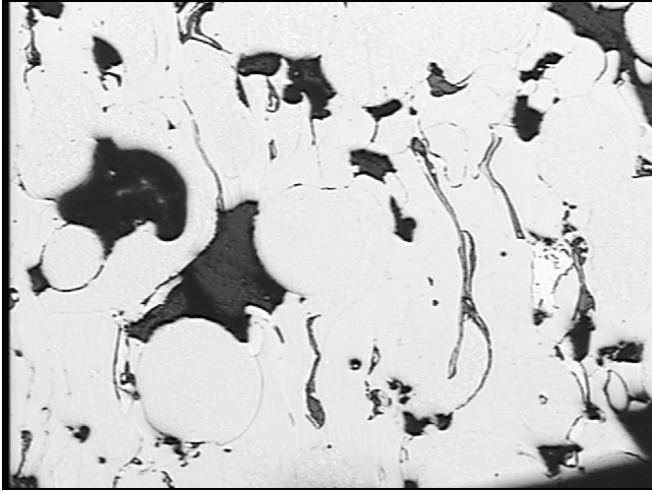
CAPITULO 8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

RESULTADOS

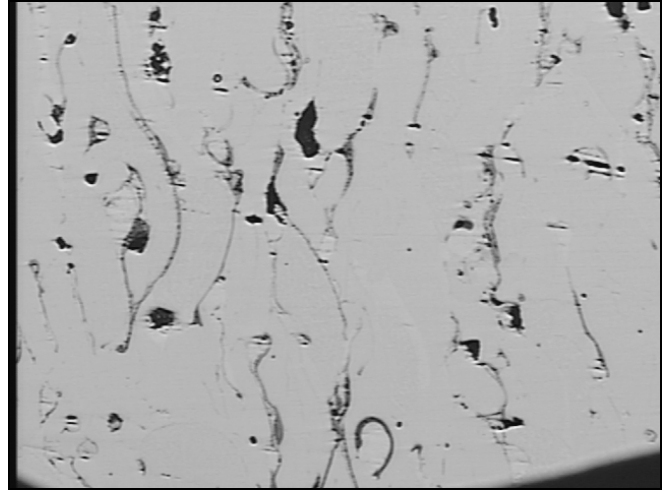
A continuación se muestran algunas de las fotografías representativas de las piezas de trabajo proyectadas tomadas en un área de sección transversal perpendicular a la cara recubierta. Para un mejor entendimiento de las fotografías mostradas a continuación se señalan las porosidades y partículas no fundidas típicas del proceso así como el sentido de desplazamiento de las partículas.



8.1 MICROGRAFIAS
(Aumento: 100X)



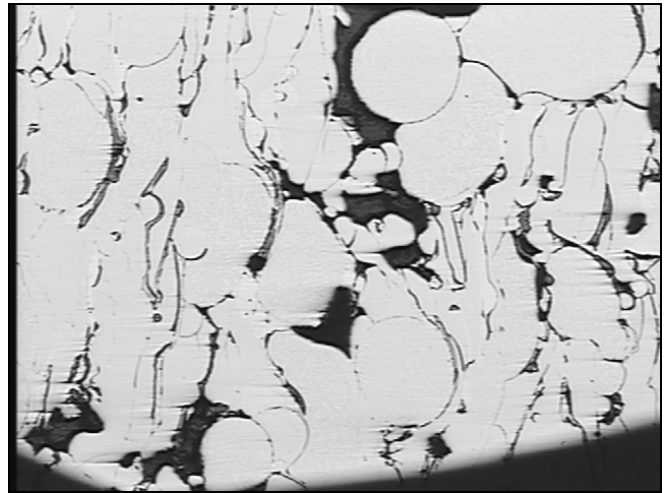
Probeta 1



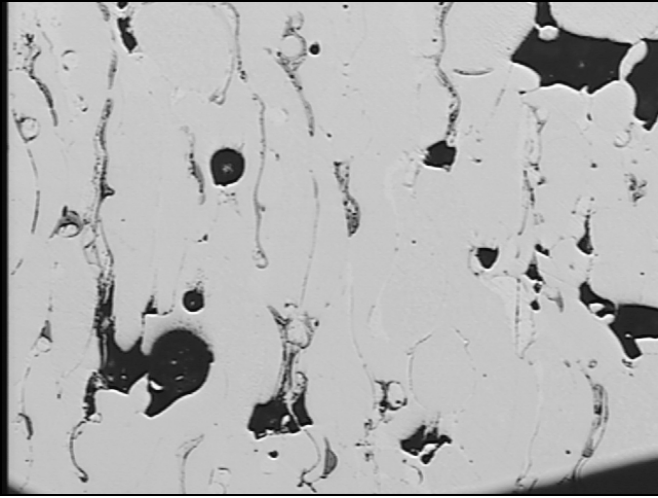
Probeta 2



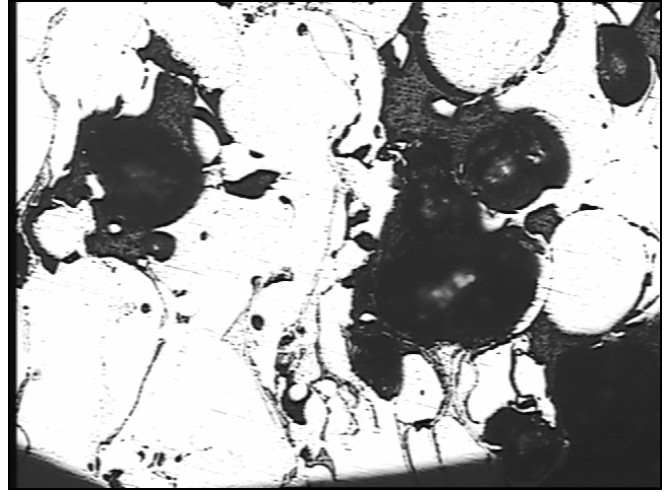
Probeta 5



Probeta 9



Probeta 6



Probeta 10

8.2 ANALISIS DE RESULTADOS

De las fotografías obtenidas a partir de los experimentos descritos previamente se puede apreciar que:

En las probetas proyectadas a 9 pulgadas:

- Independientemente de los parámetros de apertura de la válvula para la alimentación de polvos, las probetas poseen una mayor cantidad de partículas de polvo metálico sin fundir con respecto del resto de las probetas cuya distancia de proyección fue de 11 pulgadas.
- La cantidad de partículas de polvo metálico sin fundir fue aumentando conforme también lo hacia la apertura de la válvula de alimentación polvos.
- Con respecto al contenido de porosidades, se observa que existe un incremento conforme la apertura de la válvula de alimentación de polvos se incrementa.
- Se observa que aquellas probetas que se recubrieron empleando dos pasadas, poseen una menor cantidad de partículas sin fundir respecto de las que se recubrieron con una sola pasada.

En las probetas proyectadas a 10 pulgadas:

- Independientemente de los parámetros de abertura de la válvula para la alimentación de polvos, las probetas poseen una mayor cantidad de partículas de polvo metálico sin fundir con respecto del resto de las probetas.
- La cantidad de partículas de polvo metálico sin fundir permaneció prácticamente sin cambios conforme se vario la abertura de la válvula de alimentación polvos.
- Con respecto al contenido de porosidades, se observa que prácticamente no hay variación conforme la abertura de la válvula de alimentación de polvos se incrementa.
- Se observa que aquellas probetas que se recubrieron usando dos pasadas, poseen una mayor cantidad de partículas sin fundir respecto de las que se recubrieron con una sola pasada, de manera inversa a lo ocurrido e el rango de distancia de proyección anterior.

En las probetas proyectadas a 11 pulgadas:

- En general; todas las probetas proyectadas fueron obtenidas con una cantidad mucho menor tanto de partículas no fundidas como de porosidades.
- Se observa que aquellas probetas que se recubrieron empleando dos pasadas, poseen una mayor cantidad de partículas sin fundir respecto de las que se recubrieron con una capa.

En general:

- Todos los recubrimientos, independientemente de sus parámetros, poseen mayor cantidad de partículas semifundidas en la zona mas alejada del sustrato.
- Conforme la distancia de proyección disminuía y la abertura de la válvula de alimentación se aumentaba, el espesor del recubrimiento era mayor.
- En general; el perfil generado por las partículas proyectadas es el mismo, solo con variaciones de espesor.
- Conforme la distancia de proyección aumentaba, también lo hacia la capacidad de cubrir una superficie determinada.

De todo lo anterior es posible sugerir como propuesta de explicación:

- Las partículas de polvo de las probetas; cuya distancia de proyección fue muy corta, no alcanzaron un estado de fusión total debido a la proximidad del sustrato respecto de la boquilla de la pistola de proyección térmica, lo cual no permitió que dichas partículas estuvieran en contacto el tiempo suficiente con la flama para que la temperatura de la misma produjera la fusión.
- La abertura de la válvula de alimentación de polvos repercute en un contacto menos eficiente de la flama con el material de a depositar, y por lo tanto mayor cantidad de partículas sin fundir.
- A mayor cantidad de partículas fundidas, disminuye el contenido de porosidades, debido a que la deformación plástica que sufren las gotas de metal fundido al impactar con la superficie del sustrato permite una mejor distribución del material de depósito.
- El caso de las probetas que se recubrieron mediante el uso de dos pasadas; en aquellas cuya distancia de proyección fue muy corta, el contenido de partículas no fundidas y de porosidades, fue menor respecto a aquellas que se recubrieron con una sola pasada debido a que el choque térmico de las partículas fue menor ya que la cercanía de la flama permitió un precalentamiento mas efectivo de la superficie con que impactarían las partículas de la segunda capa, además de redistribuir el material depositado en la primera capa por efectos de la temperatura misma.
- El caso de las probetas que se recubrieron a traves del uso de dos pasadas; en aquellas cuya distancia de proyección fue intermedia y máxima, el contenido de partículas no fundidas y de porosidades, fue mayor respecto a aquellas que se recubrieron con una capa debido a que el choque térmico de las partículas fue mayor ya que la lejanía de la flama impidió un precalentamiento efectivo de la superficie con que impactarían las partículas de la segunda capa, además de no redistribuir el material depositado en la primera capa.
- En aquellas probetas en que la distancia de proyección fue de diez pulgadas, el aumento de partículas no fundidas y de porosidades pudo deberse principalmente a una solidificación subita de las partículas proyectadas debida a la diferencia de temperatura de las mismas respecto del sustrato, siendo menos importante en esta serie experimentos el aumento del tiempo de contacto de las partículas con la flama ocasionado por el aumento de la distancia.

- En aquellas probetas en que la distancia de proyección fue máxima, el tiempo de permanencia de las partículas de polvo dentro de la flama permitió que el grado de fusión de las partículas proyectadas fuera suficiente para impactarse, vencer el choque térmico, deformarse y distribuirse adecuadamente sobre el sustrato, para después resolidificar y reducir significativamente el contenido de porosidades y partículas no fundidas.

CONCLUSIONES

De la realización de los experimentos es posible concluir que:

- Existe un rango de combinación de parámetros que proporciona una mejor calidad en el recubrimiento depositado; dicha combinación y probetas se muestran a continuación:

Numero de Probeta	Distancia de Proyección[in]	Apertura de la válvula	Numero de pasadas
13	11	16	1
14	11	16	2
15	11	17	1
16	11	17	2
17	11	18	1
18	11	18	2

La obtención de la información anterior da validez a la hipótesis planteada al inicio de este trabajo.

- El funcionamiento del banco de pruebas fue efectivo para dar al equipo de proyección térmica por flama versatilidad en la variación del ángulo de proyección y la velocidad de rociado; así como de la distancia entre la boquilla de la pistola y la pieza de trabajo y se deja en posibilidad de automatizar en lo posterior el movimiento transversal de la pistola que permitirá la indexación del patrón de rociado.
- El proceso de proyección térmica por flama es, todavía, una opción efectiva para la aplicación de recubrimientos con características específicas limitadas compitiendo sobre todo en costos respecto a otras opciones de deposición de recubrimientos. Por lo anterior se recomienda poner especial cuidado en los criterios de selección del proceso y material de recubrimiento para cada aplicación dada.
- Las ventajas que poseen los procesos de proyección térmica es que son capaces de operar en un extenso rango de temperaturas, velocidades y condiciones atmosféricas, permitiéndoles ser aplicados en una gran variedad de materiales. Otras ventajas de los procesos de proyección térmica incluyen la capacidad de depositar recubrimientos gruesos en poco tiempo y que el recubrimiento sólo se forma en las porciones de superficie que han sido apuntadas con el dispositivo de proyección, lo cual permite la obtención de recubrimientos de espesores múltiples dentro del mismo sustrato además que se caracterizan por tener altas tasas de enfriamiento en relación a otros procesos de obtención de recubrimientos

BIBLIOGRAFÍA 1

[3] Groover, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. Cap. 18: Metalurgia de polvos . 1ª edición. Ed. Prentice-Hall, México, 1997

[6] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Introduction to thermal spray processing , pag. 3-13. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[7] Handbook of thermal spray technology 1st edition: Introduction to coatings, equipment and theory, pag. 41-46. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[8] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Coatings, Structures, Properties and materials , pag. 47-53. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[9] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Thermal Spray processes, pag. 54-76. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[11] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Process control equipment, pag. 85-98. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[19] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Materials production process, pag. 147-157. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[20] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Particle characterization, pag. 159-168. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

BIBLIOGRAFÍA 2

- [4] Groover, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. Cap. 19: Procesamiento de productos cerámicos y cermet . 1ª edición. Ed. Prentice-Hall, México, 1997
- [5] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Surface Science, pag. 14-35. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004
- [6] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Introduction to thermal spray processing , pag. 3-13. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004
- [9] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Thermal Spray processes, pag. 54-76. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004
- [10] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Cold Spray process, pag. 77-84. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004
- [13] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Introduction to processing and design , pag. 103-107. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004
- [18] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Material categories for thermal sprayed coatings, pag. 142-146. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004
- [21] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Applications for thermal spray processing, pag. 169-214. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

BIBLIOGRAFÍA 3

[14] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Coating processing, pag. 108-119. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[25] Sampson, Elliott R.: "Grit blasting: Starting your thermal spray job correctly". Welding Journal Vol.85 Number 5, May 2006 page 36. Ed. American Welding Society (AWS)

BIBLIOGRAFÍA 4

[12] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Health and safety equipment, pag. 99-102. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[15] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Coating operations, pag. 120-127. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[23] Praxair technical data bulletin. File: 1.9.1.1.4, Issue No.:M10221. TAFA Inc. Concord, N.H., USA. 1990

BIBLIOGRAFÍA 5

- [16] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Postcoating operations, pag. 128-132. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004
- [22] Metals hadbook 9th edition, Vol. 5 Surface cleaning, finishing and coating: thermal spray coatings, International, Metals Park, OH. USA. 1982
- [24] Heath, G.R.; Polak, R.; Tsujita, T.; Gustafsson, S.: “Role of ternal spray coatings in boilers; Development of reliable spray and fuse coatings in bolçiler protection” NTSC’96 (National Thermal Spray Conference). Cincinnati, Ohio, USA. 7-11 Oct. 1996
- [26] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Testing of coatings, pag. 260-272. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

BIBLIOGRAFÍA 6

[11] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Process control equipment, pag. 85-98. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

[17] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Feedstock materials considerations, pag. 137-141. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

BIBLIOGRAFÍA 7

[1] Groover, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. Cap. 1: Introducción. 1ª edición. Ed. Prentice-Hall, México, 1997

[2] Groover, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas. Cap. 33: Procesos de recubrimiento y deposición . 1ª edición. Ed. Prentice-Hall, México, 1997

[28] Shigley, Joseph Edward. “El proyecto en ingeniería mecánica” 1ª edición. Ed, Mc Graw-Hill, México 1970. Cap. 7 pág. 247

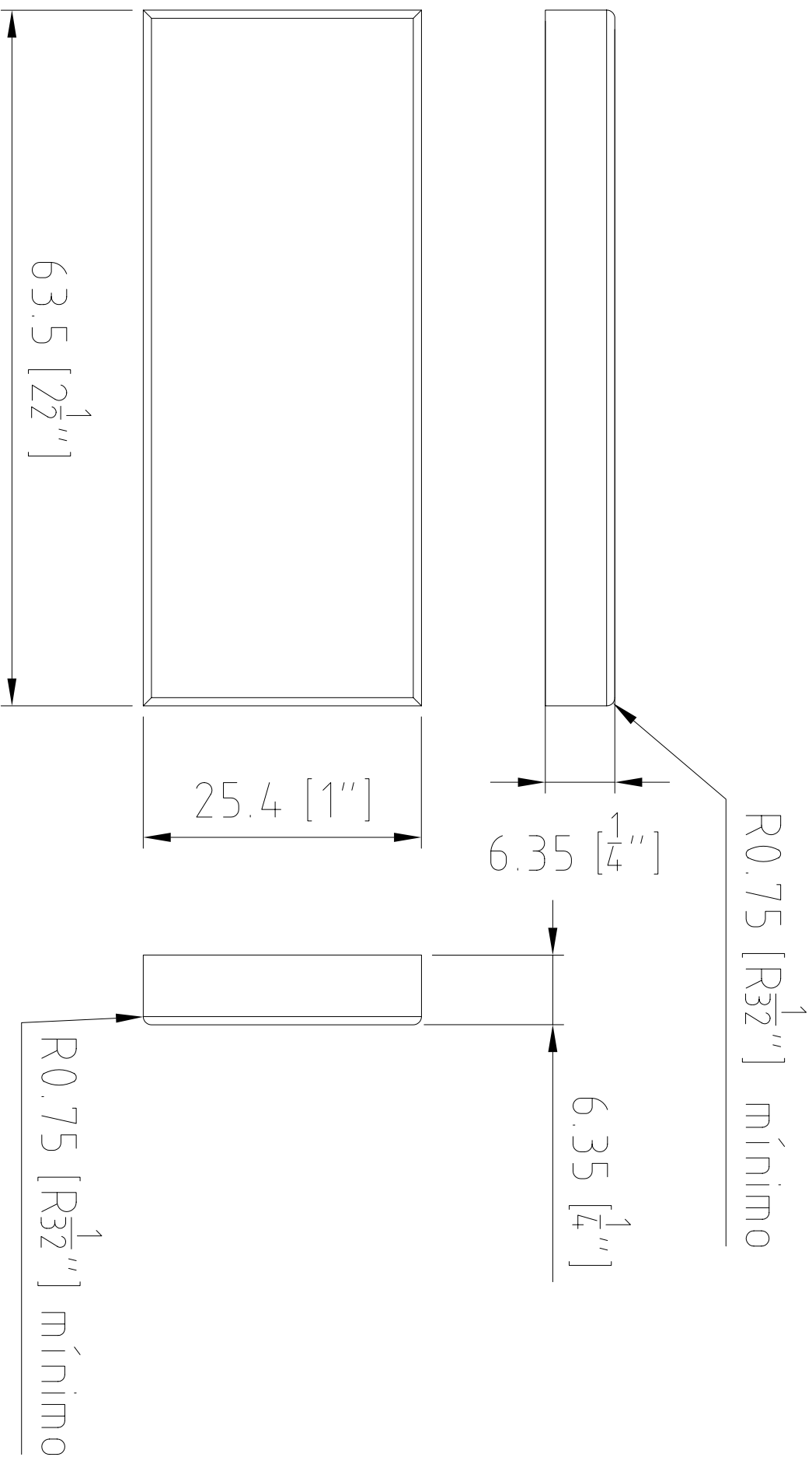
www.thermal-spray-depot.com

www.rockfordballscrew.com

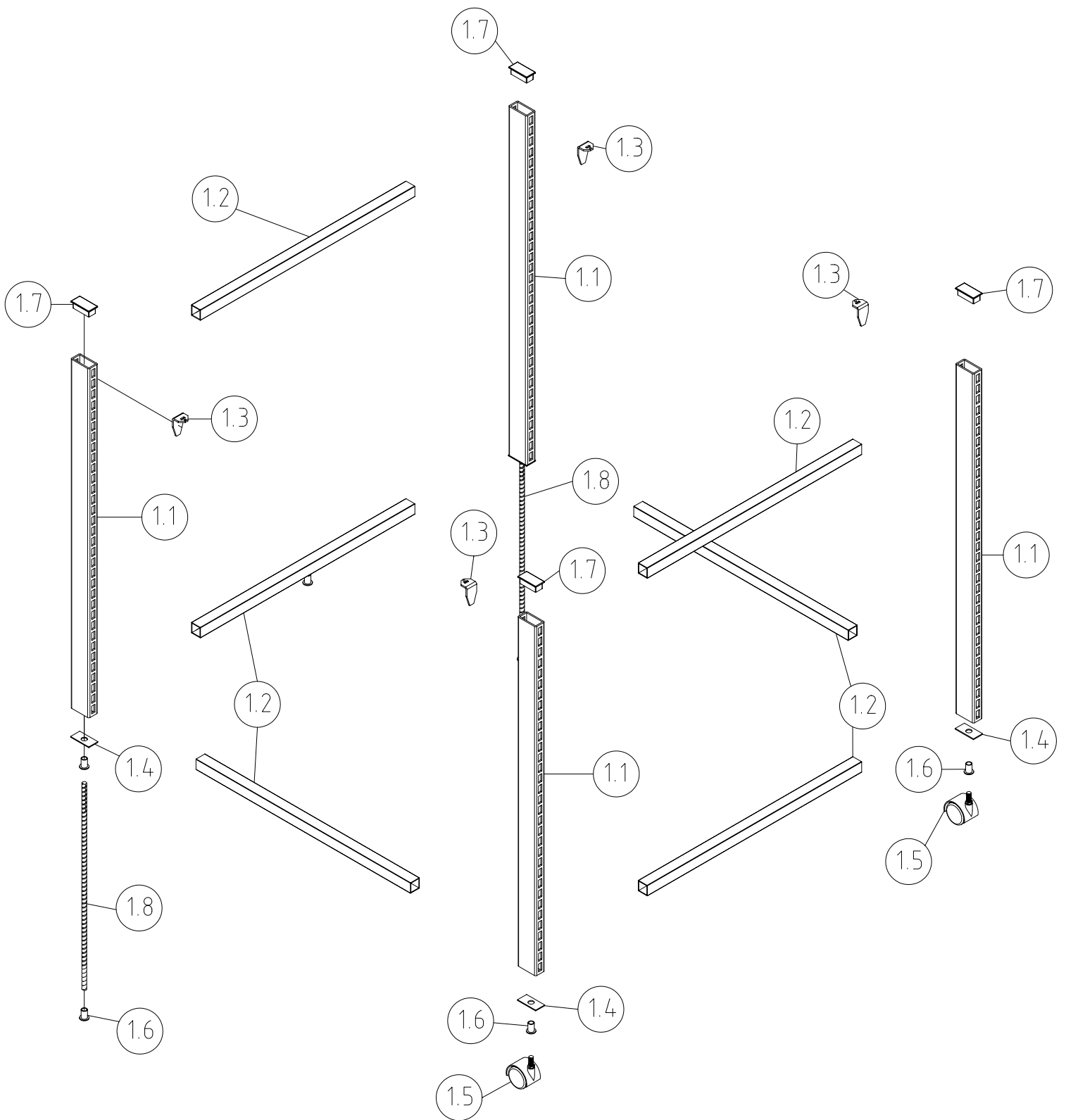
BIBLIOGRAFÍA 8

[27] Handbook of thermal spray technology, 1st. edition: Metallography and image analysis, pag. 223-259. ASM International, Metals Park, OH. USA. 2004

Material: Acero Comercial (Por ejemplo SAE 1008)

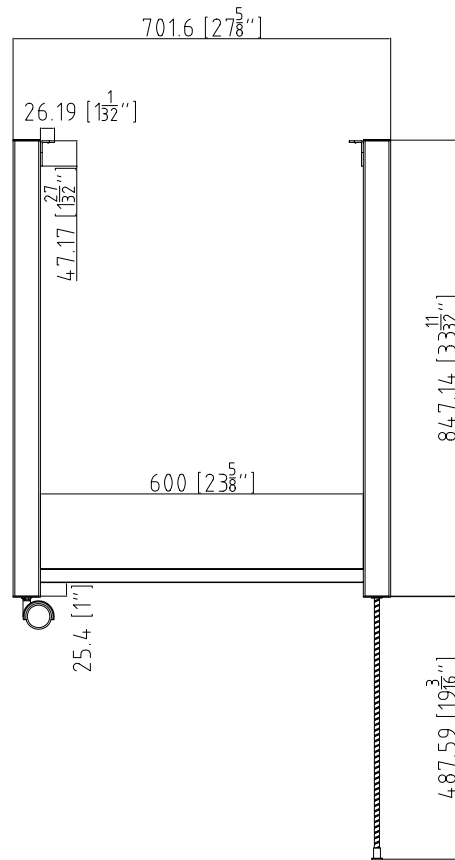
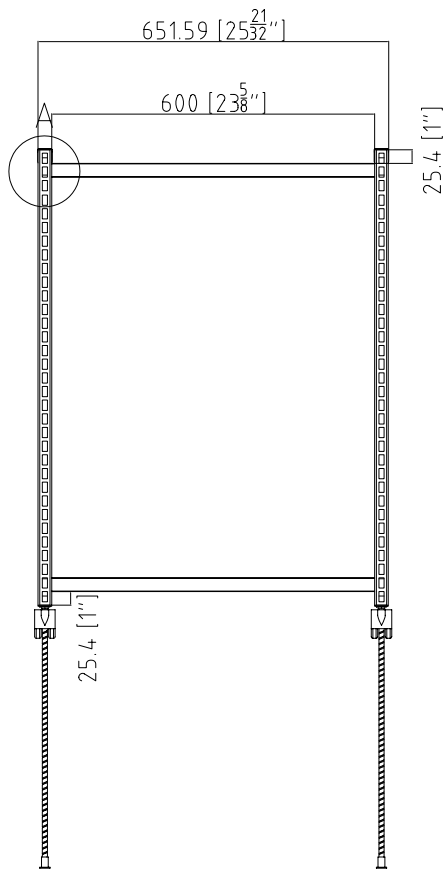
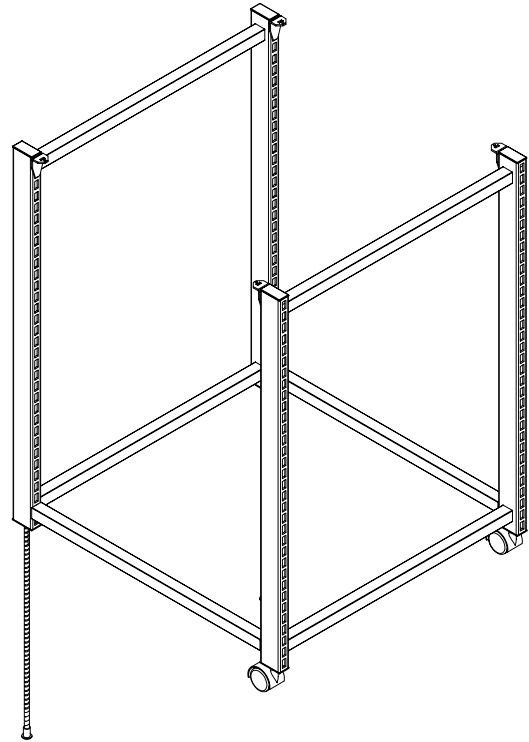
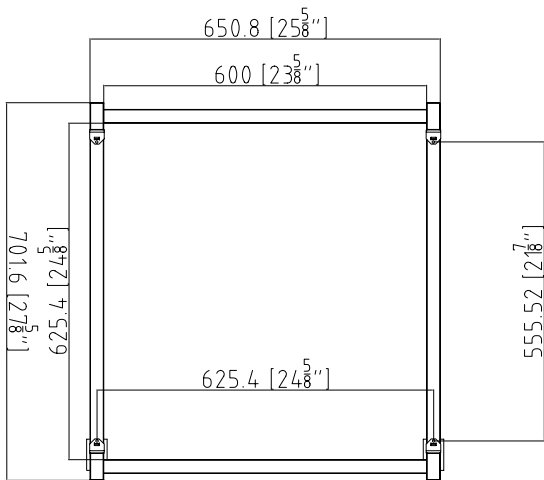
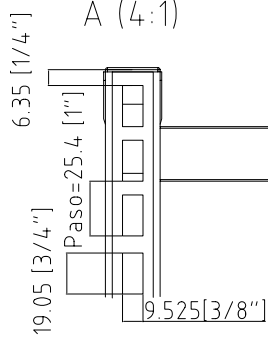


INGENIERÍA MECÁNICA F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS: mil/in]	Especificaciones de las probetas
Esc.: S.E.	CLAVE: 1-B HOJA : 1/1
Las cotas rigen al dibujo	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"
Esc.: S.E.	Estructura-Despiece
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 1 HOJA :2/3
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

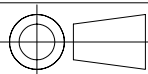
A (4:1)



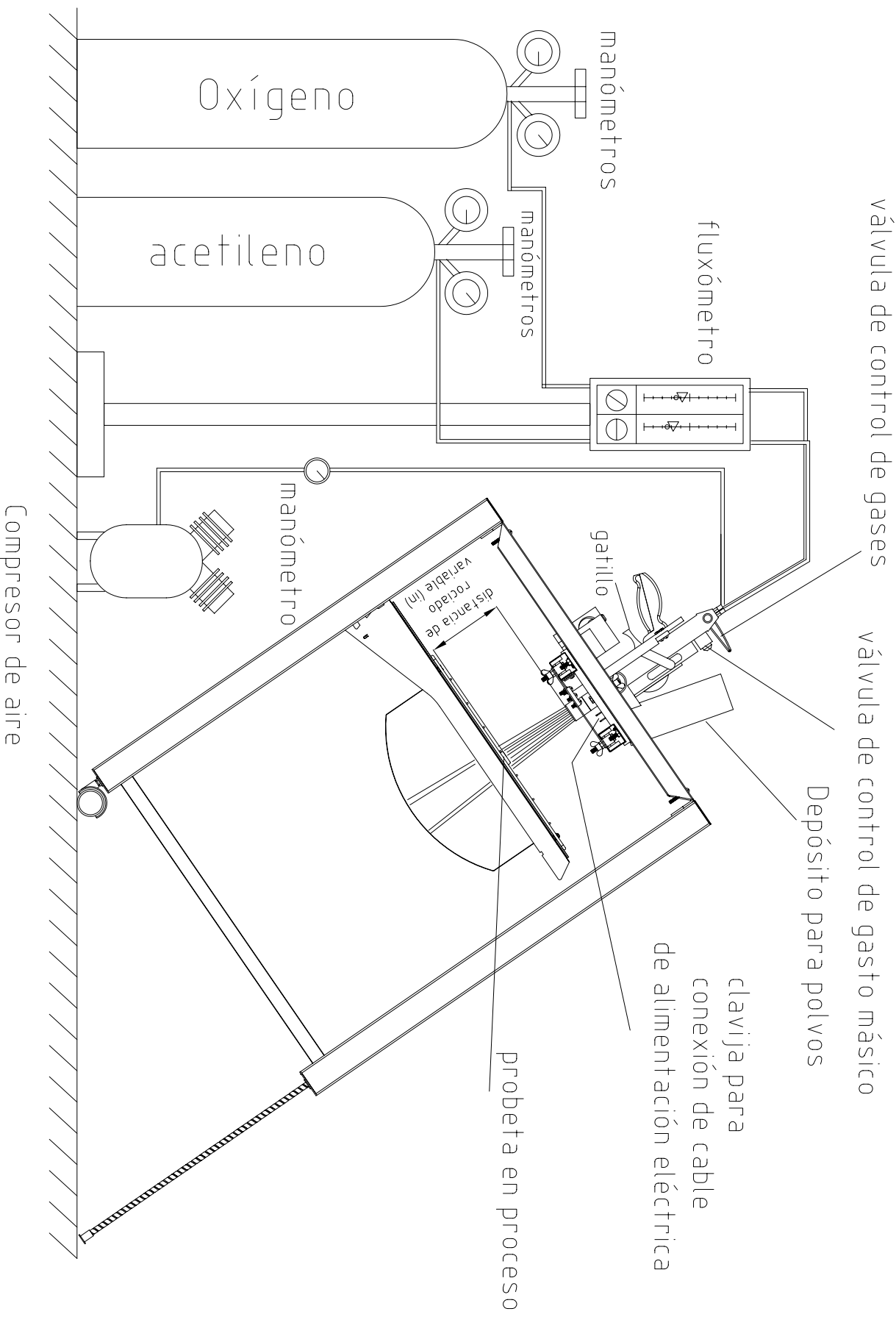
INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"	Estructura-Ensamble	
Esc.: S.E.		CLAVE: 3 HOJA : 1/3	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

LISTA DE MATERIALES

- 1.1) PTR 2" x 1" cal. 13 ranurado (detalle en plano 3), L= 847.14 mm
- 1.2) PTC 1" x 1" cal. 16 , L= 600 mm
- 1.3) Top cal. 10 con barreno de 3/16" diám.
- 1.4) Tapa de 2" x 1" de lámina cal. 14 con barreno de 17/32" diám. al centro
- 1.5) Ruedas dobles con freno, diámetro 2", ancho 1 1/2", sujeción por espárrago 3/8" diám
- 1.6) Tuerca remache para tornillo de 3/8" diam, Diám. exterior= 1/2"
- 1.7) Regatones de Polietileno para PTR de 2" x 1"
- 1.8) Espárrago de 3/8" diám. L= 500 mm

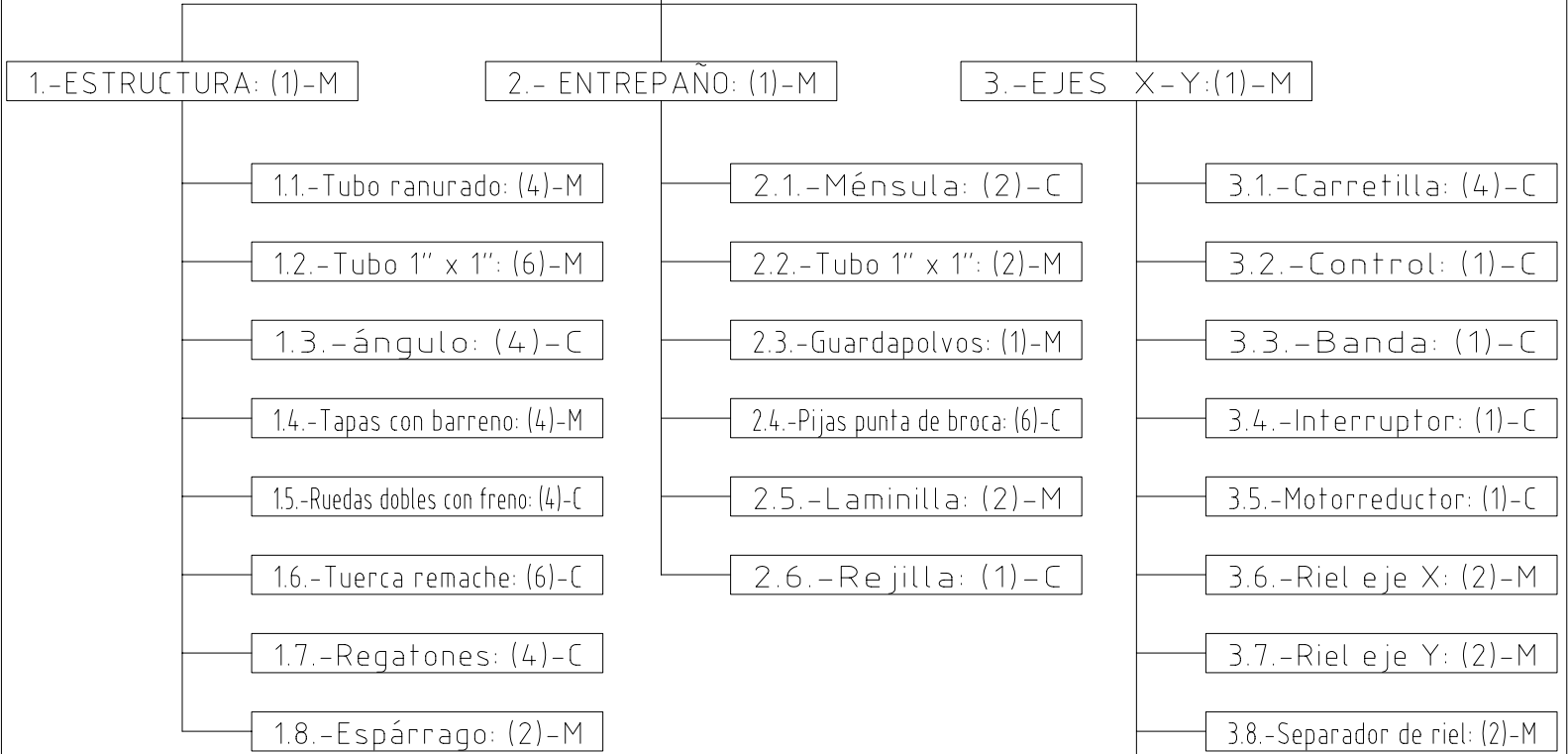
INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 1/32" Estructura-Lista de materiales
Esc.: S.E.	CLAVE: 1 HOJA :3/3
Las cotas rigen al dibujo	 DIB.: MARO | REV.: MARO, RGVN

CONEXIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS: in[mm]	Tol. +/-
ESQ.: S.E.	ESQUEMA DE CONEXIONES DEL BANCO DE PRUEBAS
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 1-A HOJA: 1/1
	DB: MARO REV: MARO, RGVN

BANCO DE PRUEBAS



CODIFICACIÓN:

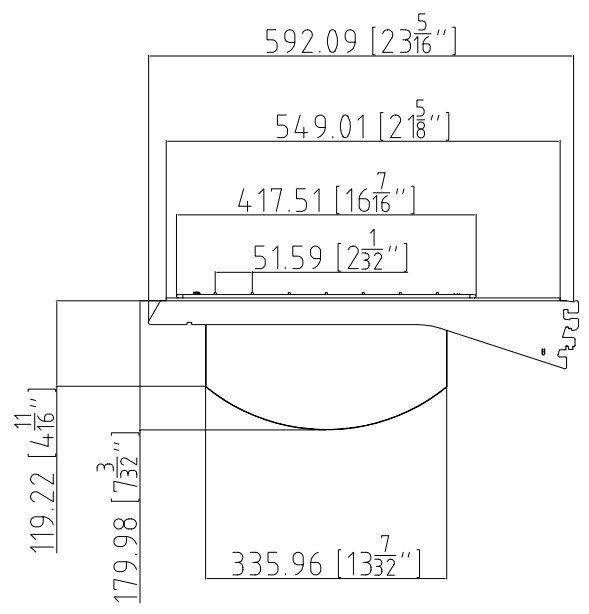
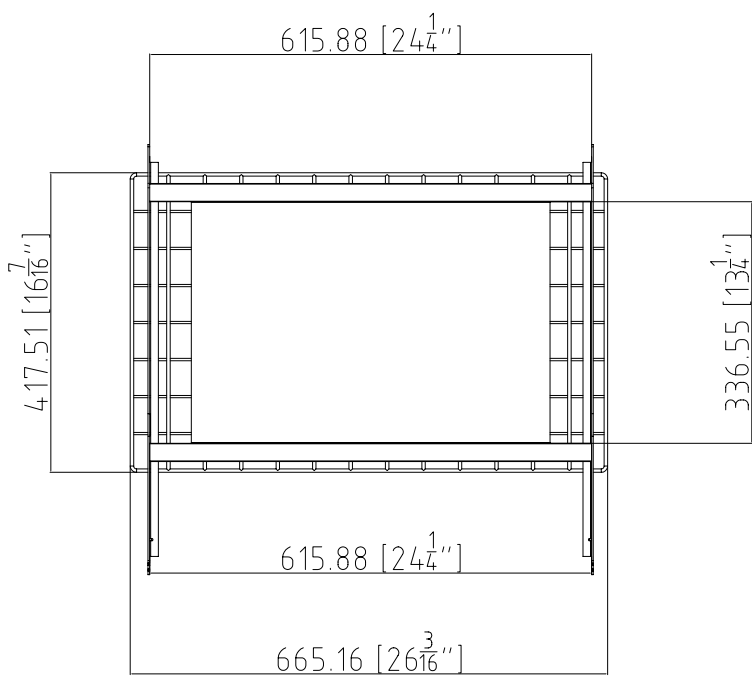
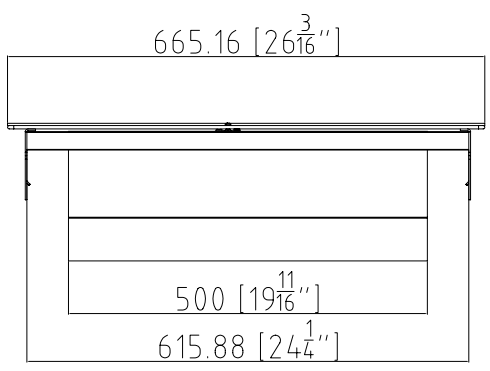
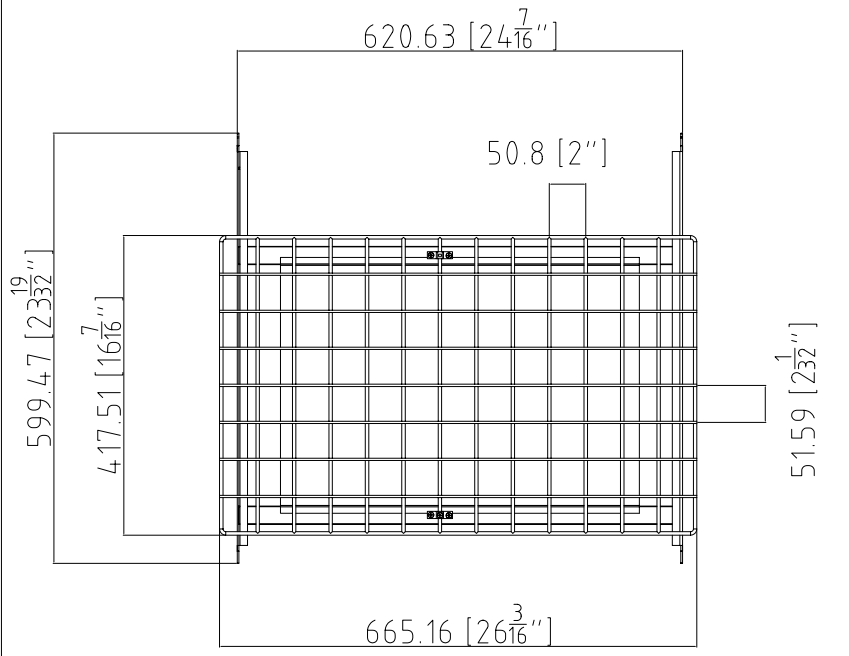
Naturaleza: M: Recibió alguna operación de manufactura
 C: Se empleó tal y cómo se compró

1.1.1.1.-NOMBRE: (1)-M ←
 ↑↑↑↑ cantidad de la parte o ensamble

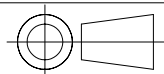
clave referente al nivel de ensamble

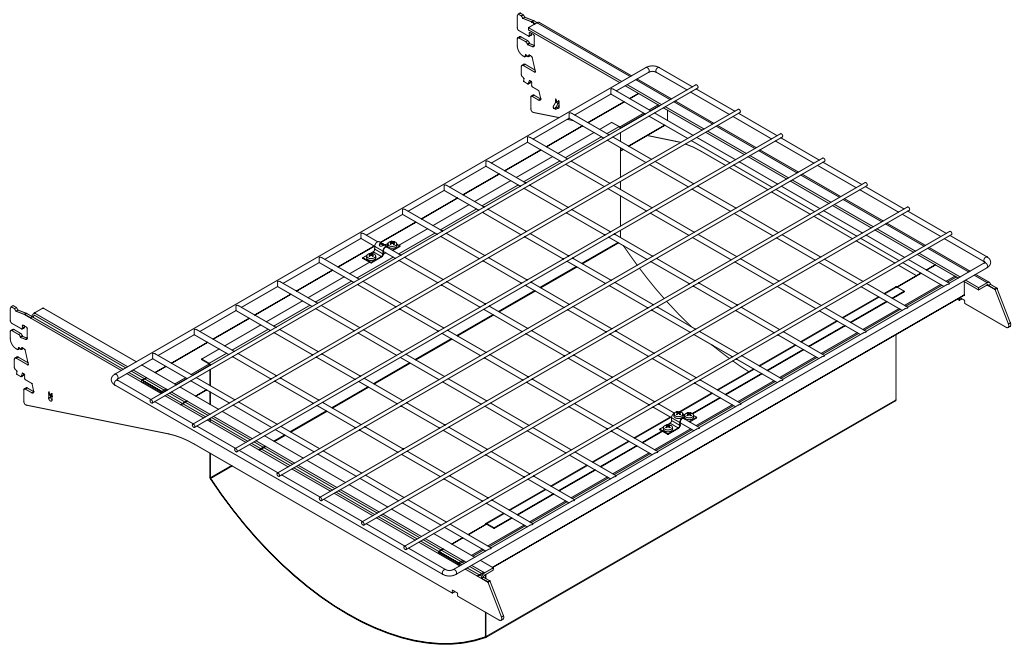
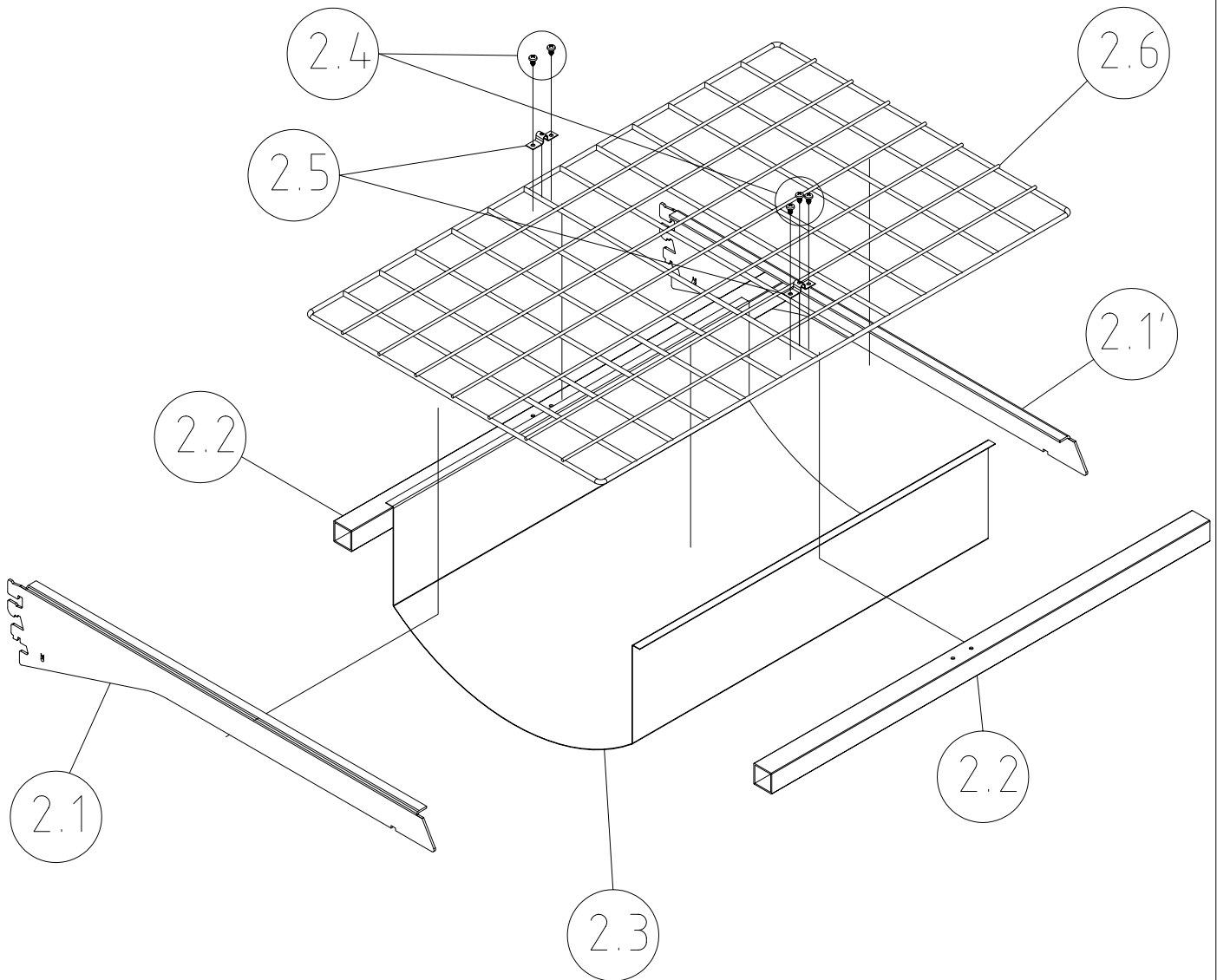
- 3.16.1-Base: (1)-M
- 3.16.2.-Carretilla: (4)-C
- 3.16.3.-Poste: (2)-M
- 3.16.4.-"L" de conexión: (1)-M
- 3.16.5-Soporte para pistola: (1)-M
- 3.16.6.-Tornillos y tuercas: (42)-C

INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.		DIAGRAMA DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO DE PRUEBAS	
Esc.: S.E.		CLAVE: 1-C HOJA : 1/1	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"
Esc.: S.E.	Entrepaña-Ensamble
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 2 HOJA :1/3
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

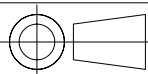




INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"	Entrepaño-Despiece	
Esc.: S.E.		CLAVE: 2 HOJA :2/3	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

LISTA DE MATERIALES

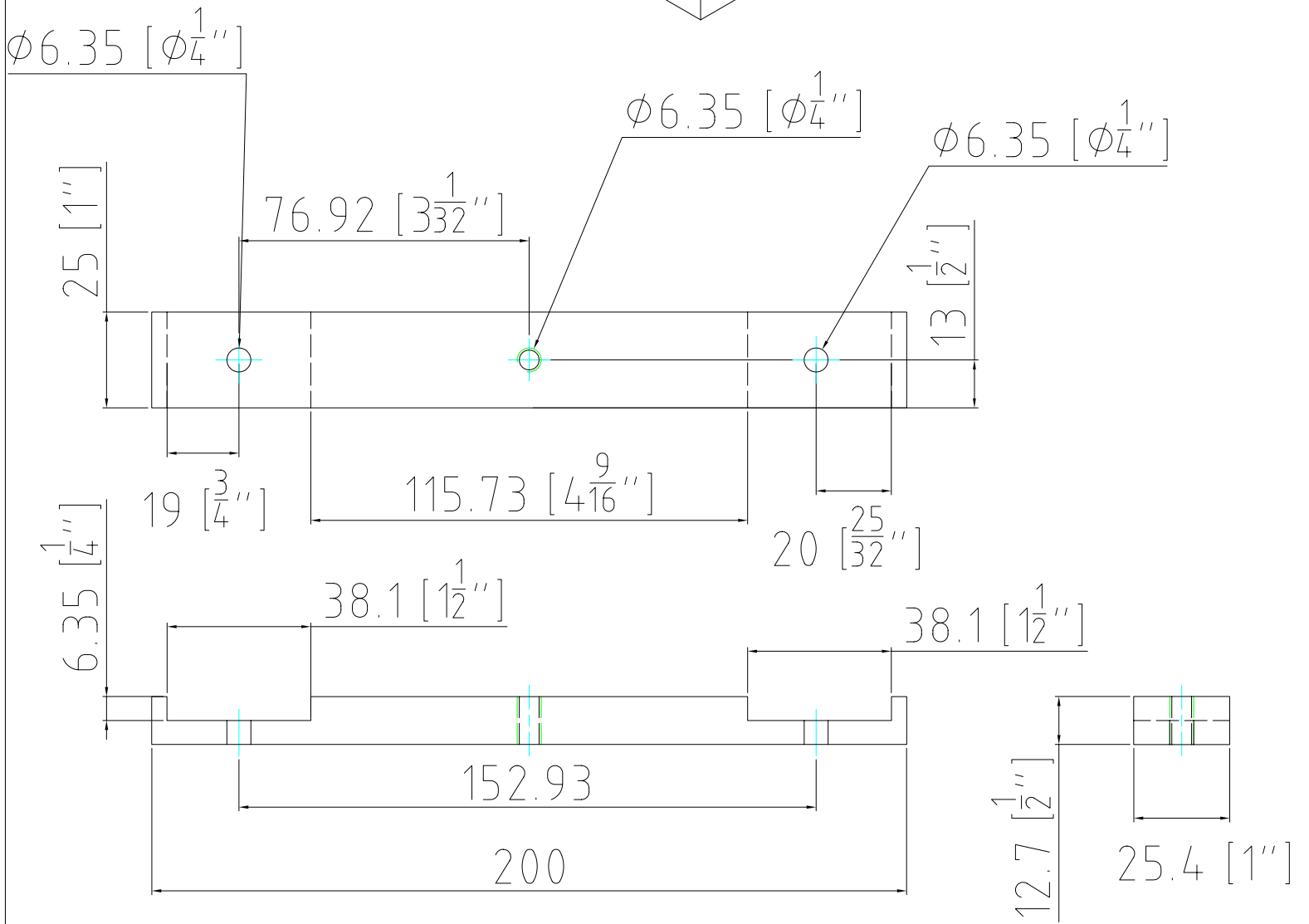
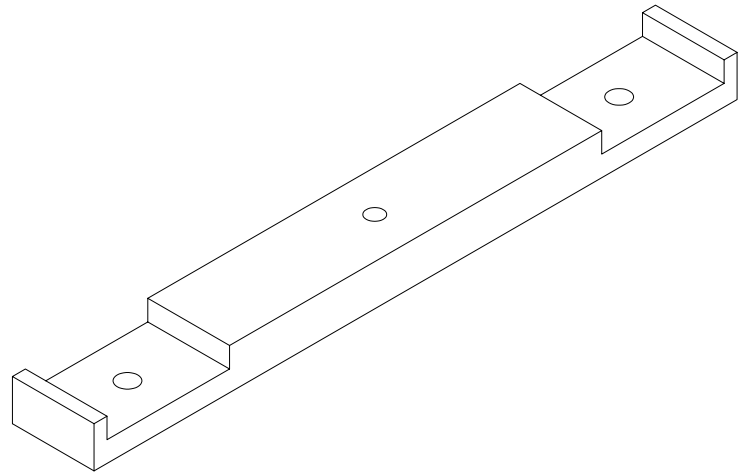
- 2.1) Ménsula de alta resistencia de 22" -3 posiciones cal. 13, paso 1" - Izquierda
- 2.1) Ménsula de alta resistencia de 22" -3 posiciones cal. 13, paso 1" - Derecha
- 2.2) PTC de 1" x 1" cal.16, L=24 1/4"
- 2.3) Guardapolvos de lámina galvanizada cal.20. Sus dimensiones aparecen en el plano 2-1
- 2.4) Pijas punta de broca para barrenado de 1/8", L= 1/4"
- 2.5) Laminillas de 1/2" x 1 1/2" de acero cal. 22 para fijación de la rejilla en el entrepaño
- 2.6) Rejilla formada por redondos de acero de 3/16" diám. y 1/8", malla de 2"

INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"	Estructura-Lista de materiales	
Esc.: S.E.		CLAVE: 2	HOJA :3/3
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

MATERIAL: Aluminio

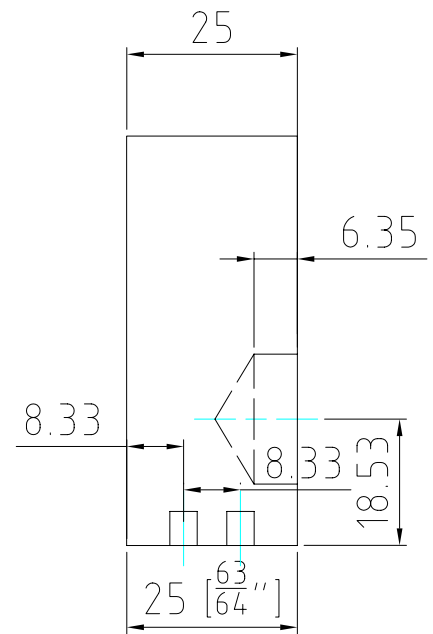
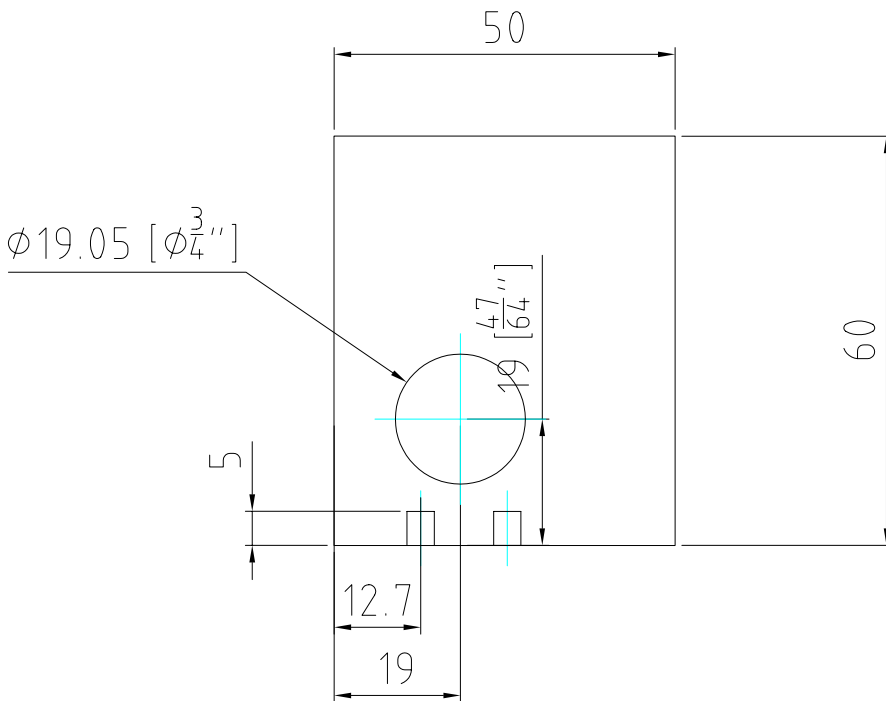
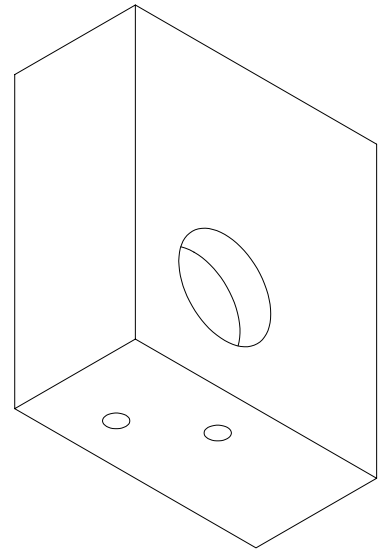
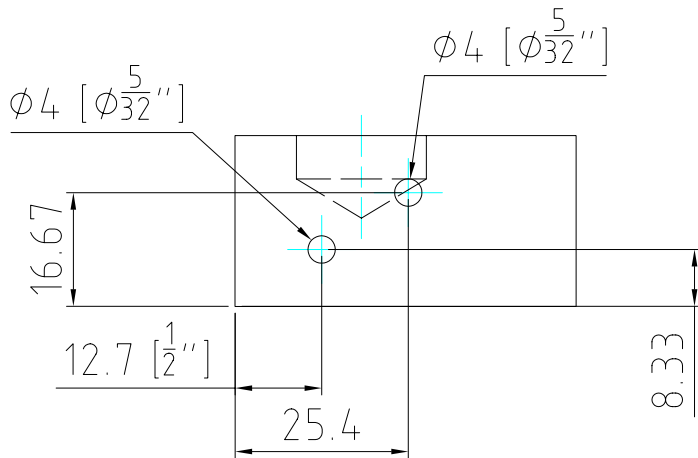
ACABADO: SIN.

CANTIDAD: 1 pza.



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm	separador de rieles
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.8 HOJA : 1/1
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO | REV.: MARO, RGVN

MATERIAL: Aluminio	
ACABADO: SIN.	
CANTIDAD: 1 pza.	

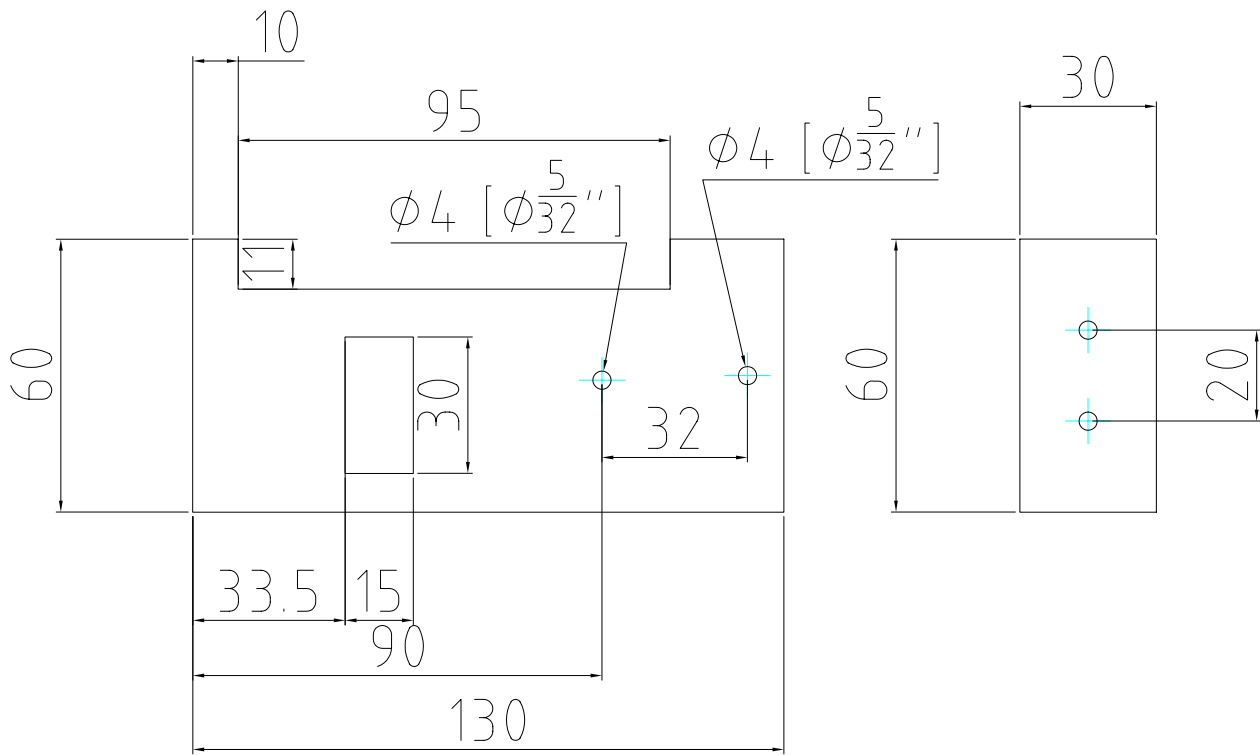
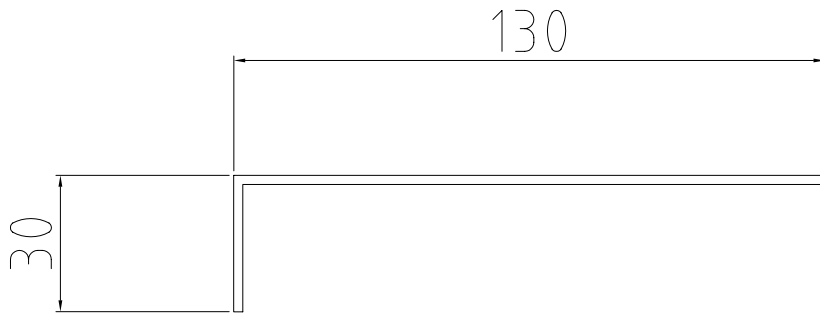
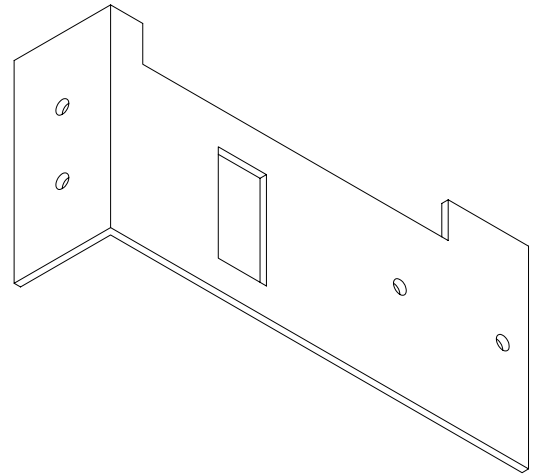


INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm
Esc.: S.E.	Contrapunto
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 3.9 HOJA : 1/1
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

MATERIAL: Acero cal. 14

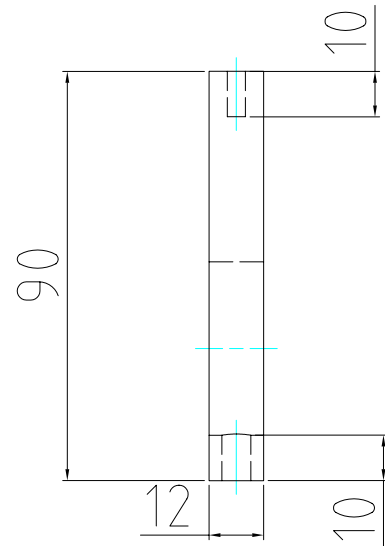
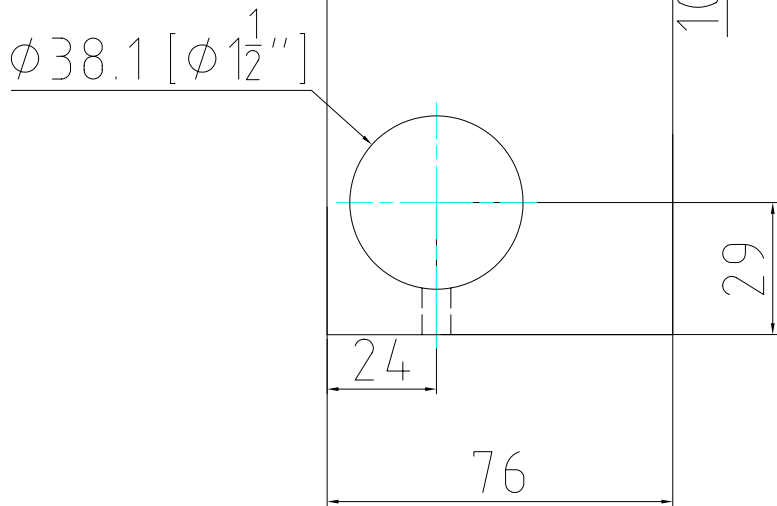
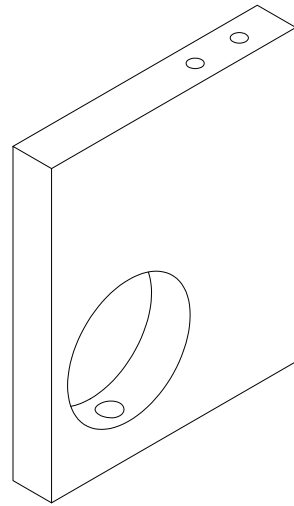
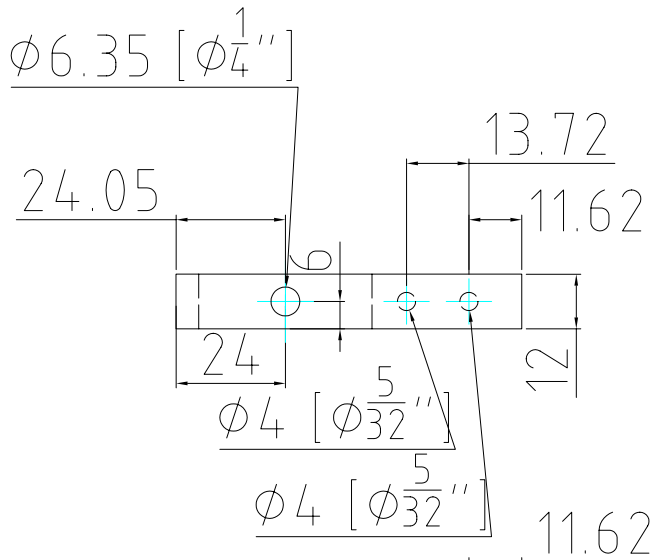
ACABADO: SIN.

CANTIDAD: 1 pza.



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm	soporte del control	
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.11 HOJA : 1/1	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

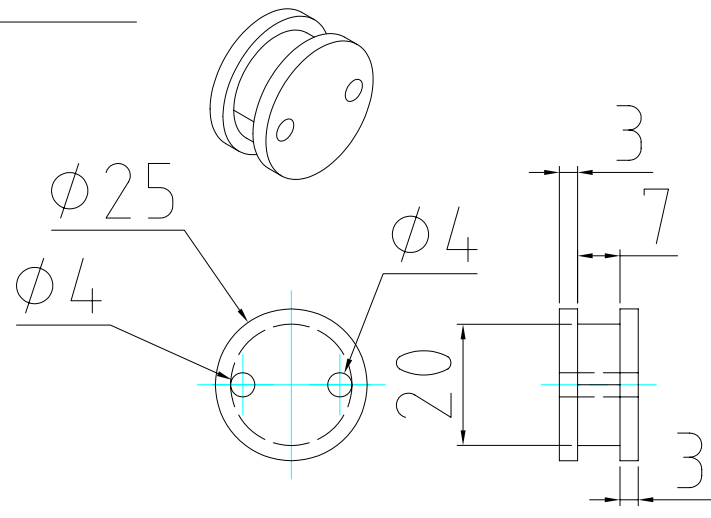
MATERIAL: Aluminio	
ACABADO: SIN.	
CANTIDAD: 1 pza.	



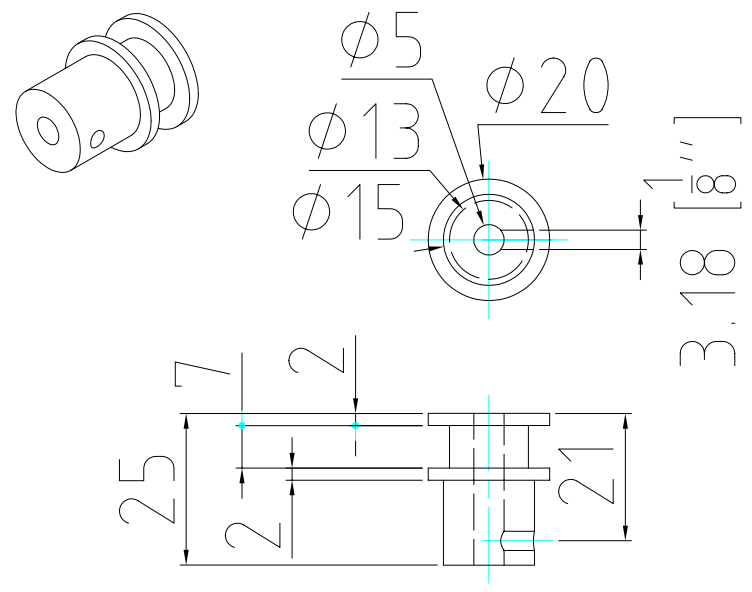
INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm
Esc.: S.E.	soporte del motor
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 3.12 HOJA: 1/1
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

MATERIAL: Aluminio	
ACABADO: SIN.	
CANTIDAD: 1 pza. de c/u	

POLEA CONDUCTIDA



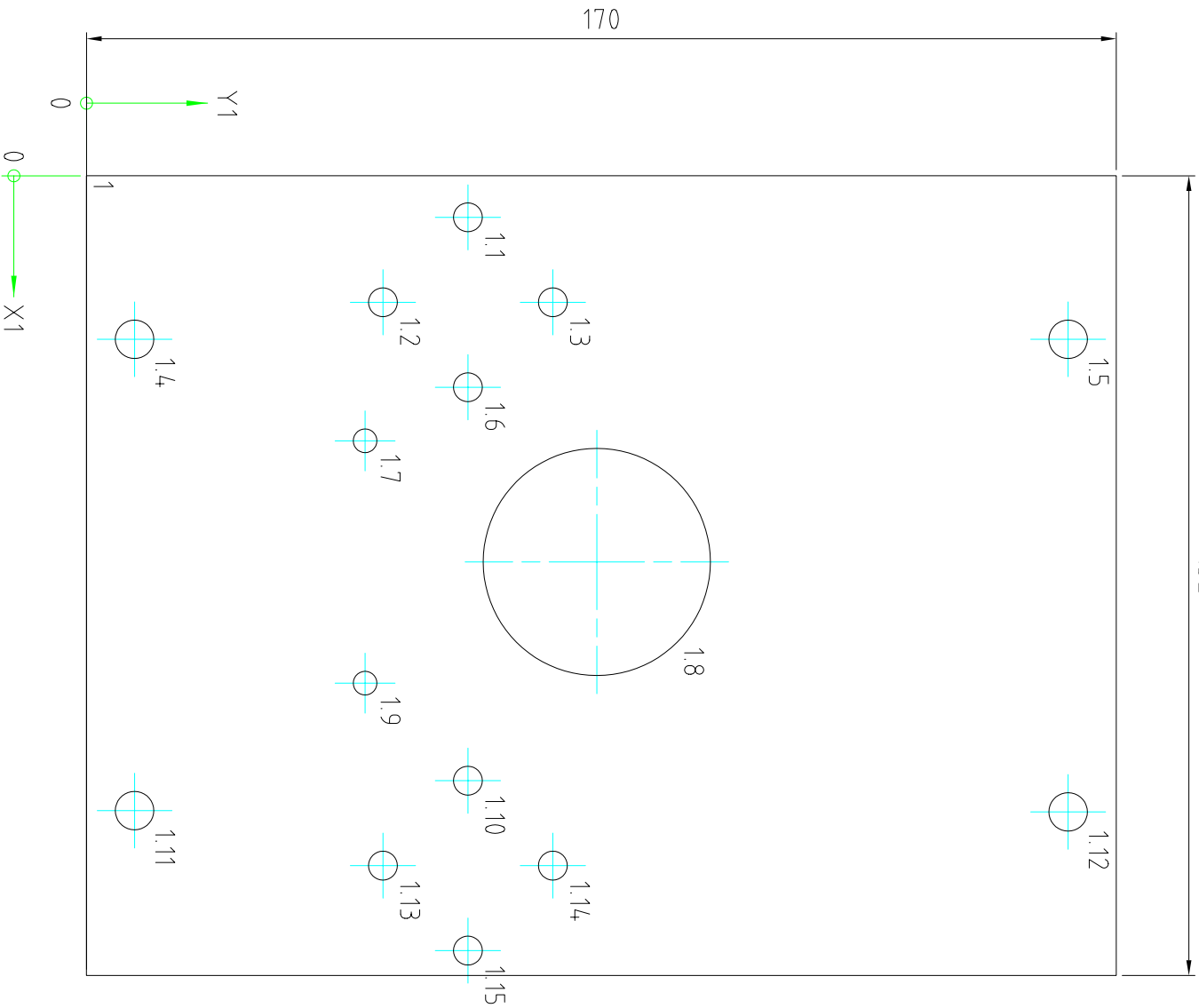
POLEA CONDUCTORA



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.		BANCO DE PRUEBAS
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm	POLEAS
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.13 Y 3.14 HOJA : 1/1
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO | REV.: MARO, RGVN

MATERIAL: Acero cal.14
 ACABADO: SIN.
 CANTIDAD: 1 pza.

132



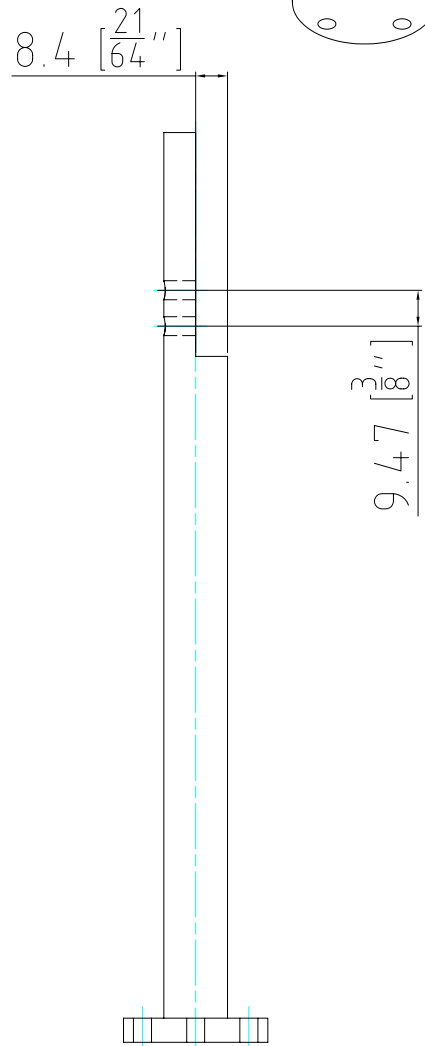
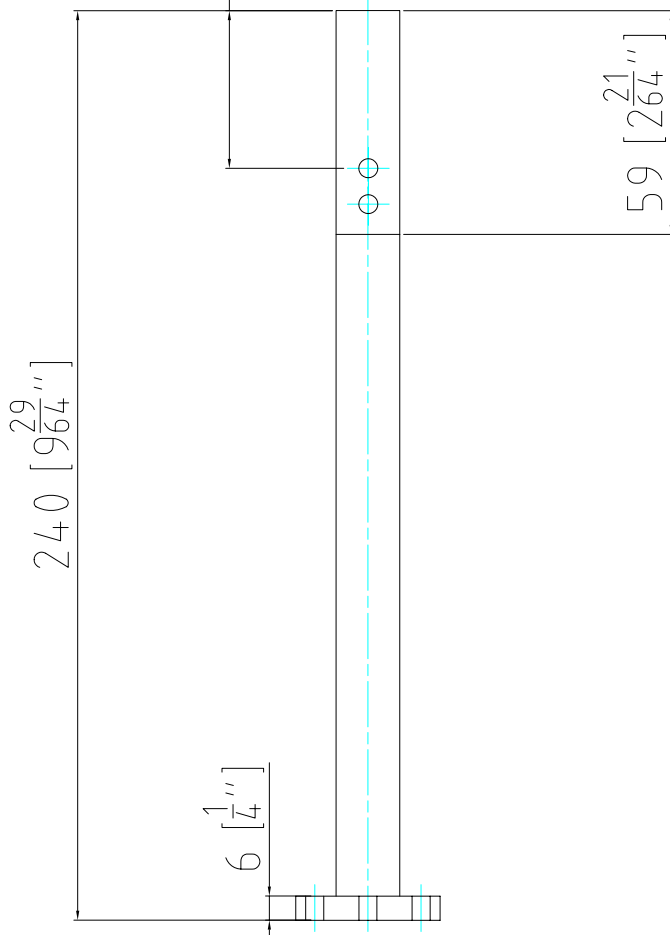
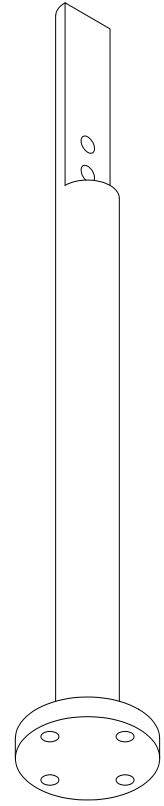
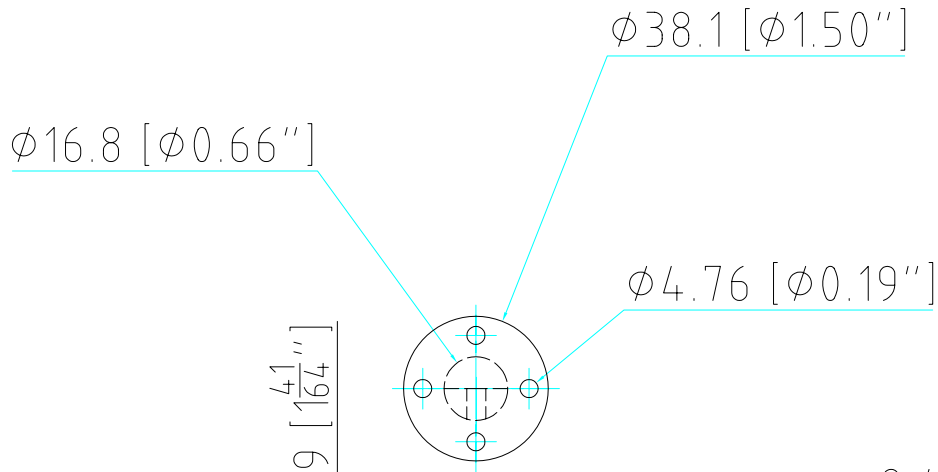
List of Coordinates			
Hole	X	Y	φ
1.1	6.85	62.97	φ4.76
1.2	20.88	48.94	φ4.76
1.3	20.88	76.99	φ4.76
1.4	26.99	7.94	φ6.35
1.5	26.99	162.06	φ6.35
1.6	34.9	62.97	φ4.76
1.7	43.75	46	φ3.91
1.8	63.75	84.25	φ37.5
1.9	83.75	46	φ3.91
1.10	99.85	62.97	φ4.76
1.11	104.8	7.94	φ6.35
1.12	105.01	162.06	φ6.35
1.13	113.88	48.94	φ4.76
1.14	113.88	76.99	φ4.76
1.15	127.9	62.97	φ4.76

INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm		
ESC.: S.E.		CLAVE: 3.16.1 HOJA: 1/1	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

MATERIAL: Aluminio

ACABADO: SIN.

CANTIDAD: 2 pzas.

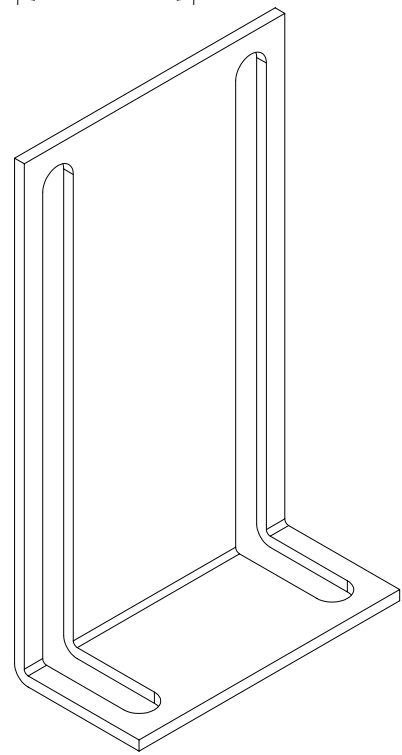
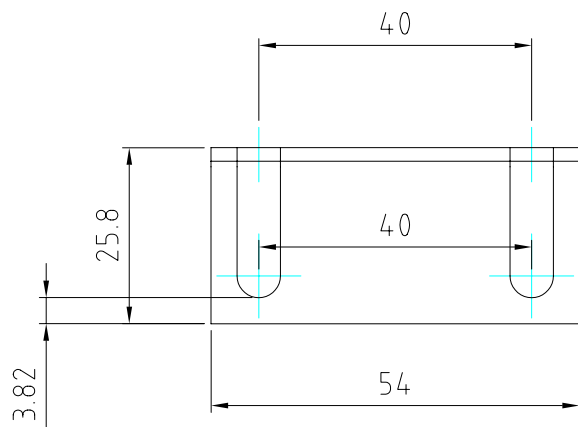
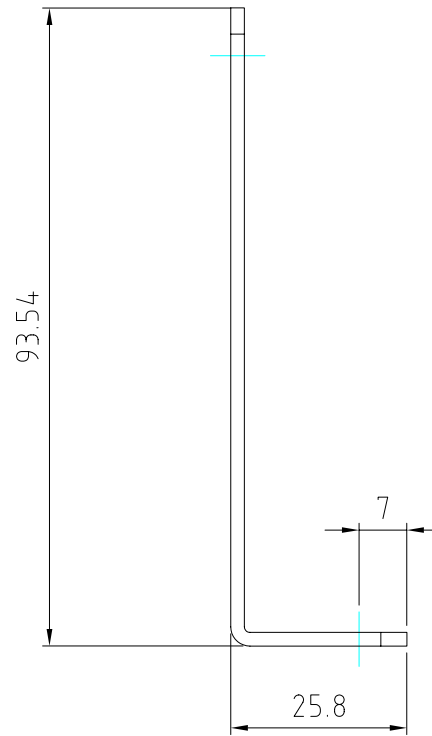
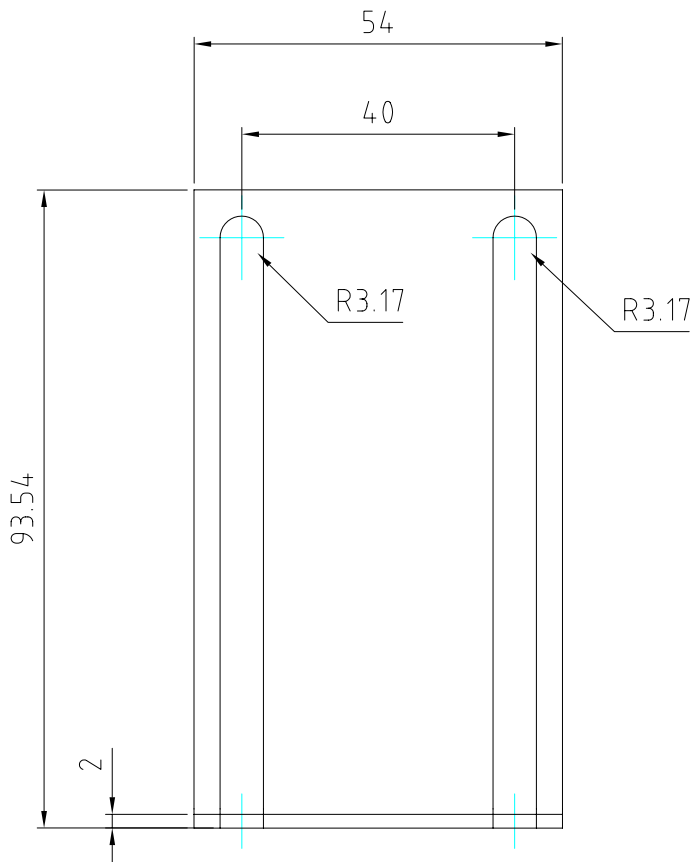


INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm	Poste sujeción pistola	
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.16.3 HOJA : 1/1	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

MATERIAL: Acero cal.14

ACABADO: SIN.

CANTIDAD: 1 pza.

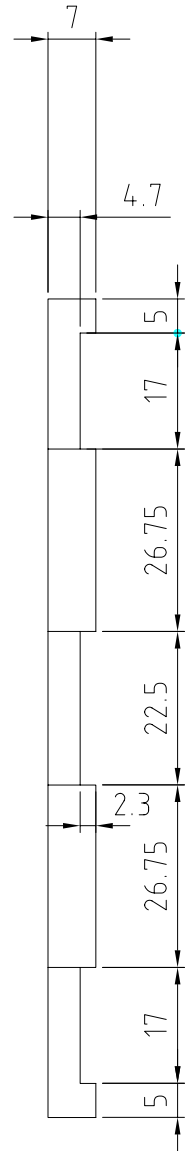
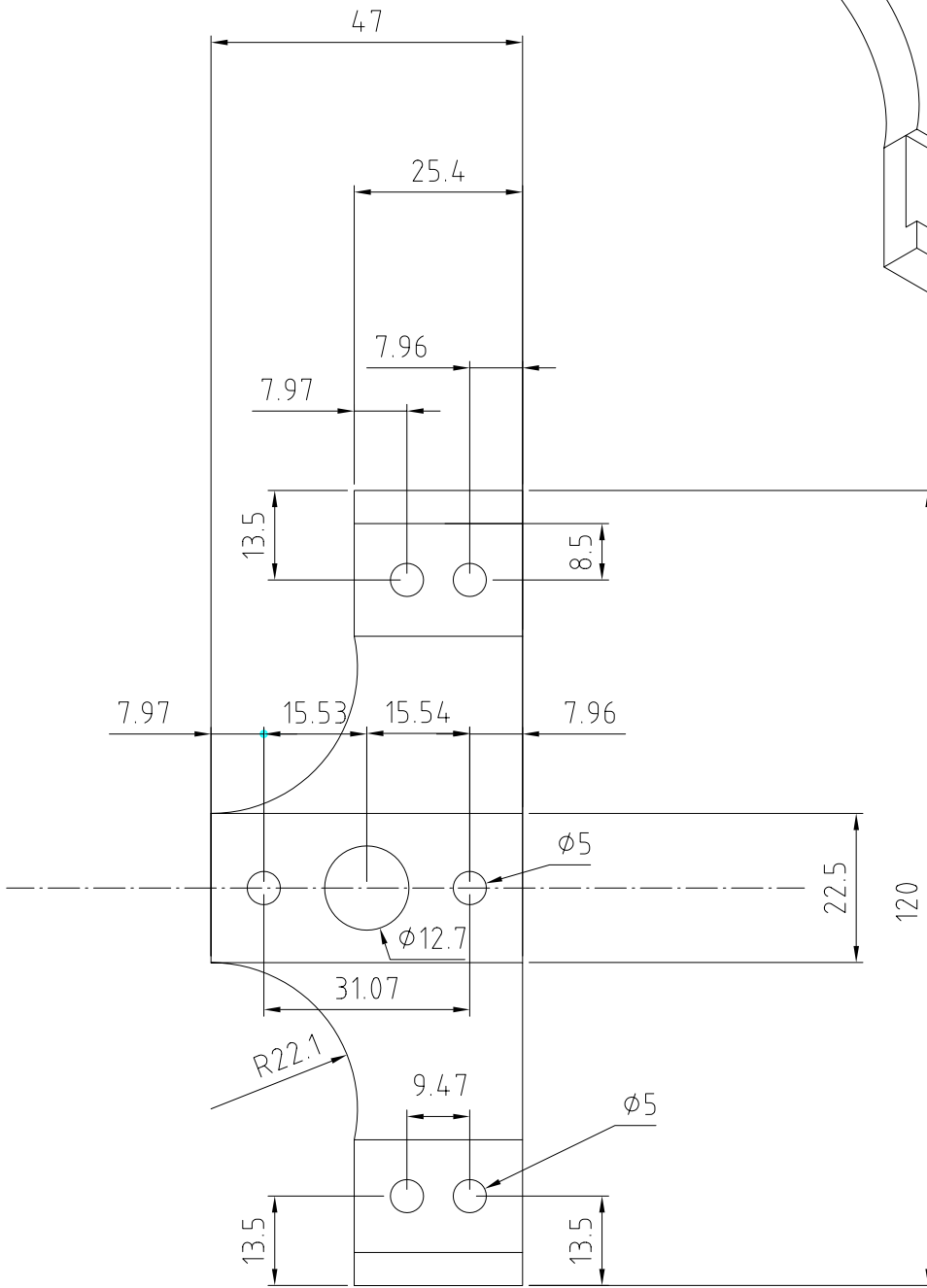
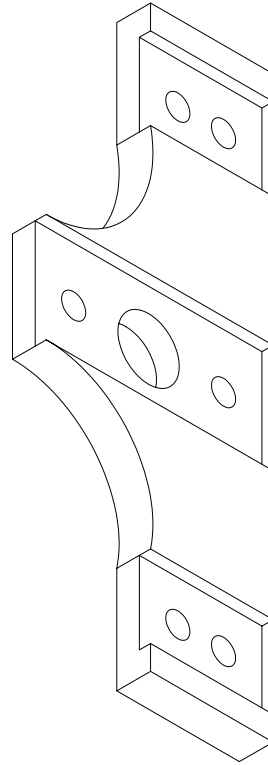


INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UN.A.M.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm	"L" para conexión	
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.16.4 HOJA : 1/1	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

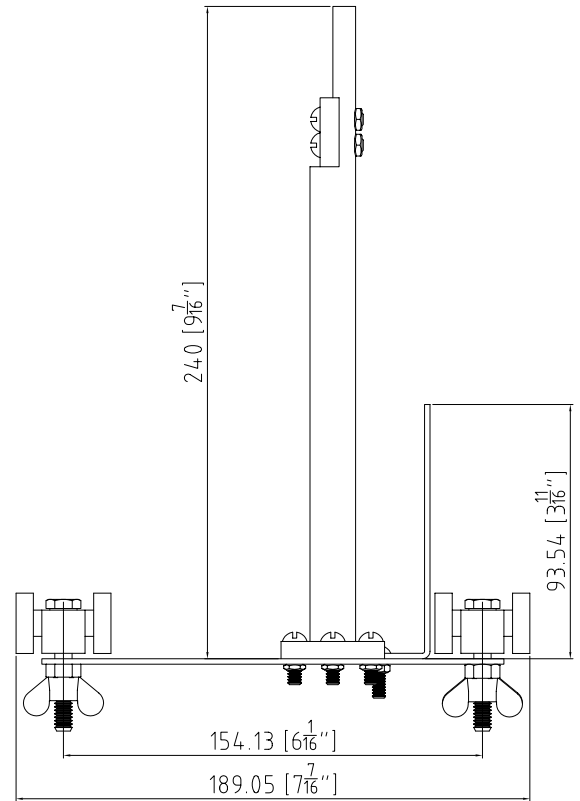
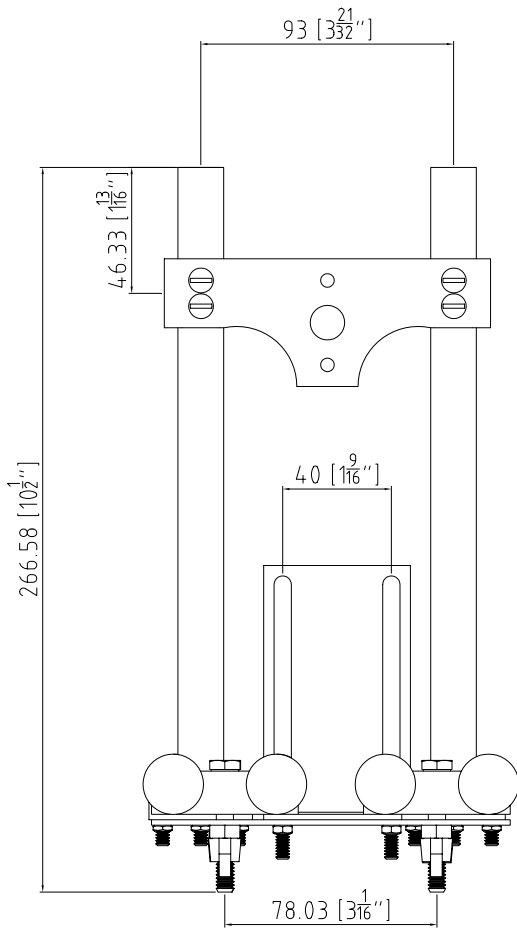
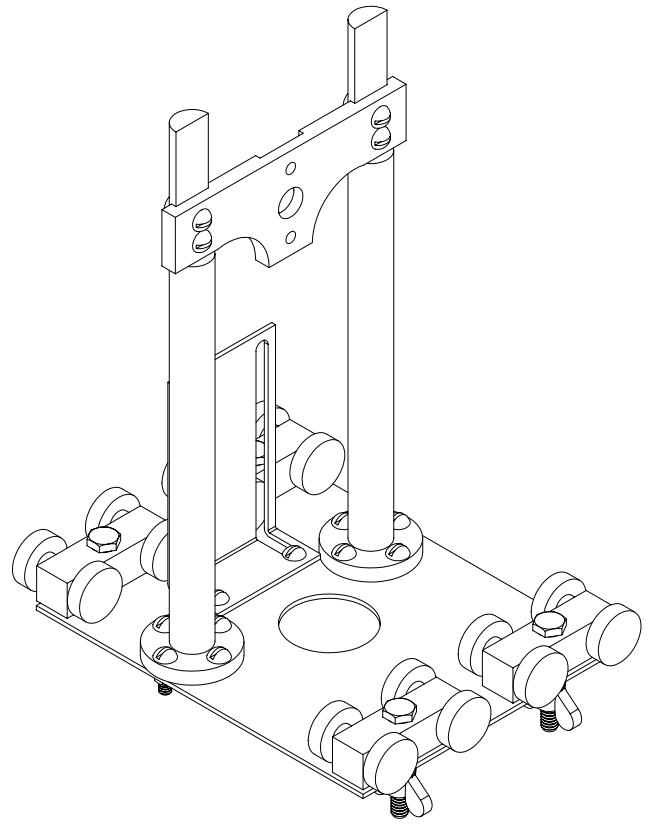
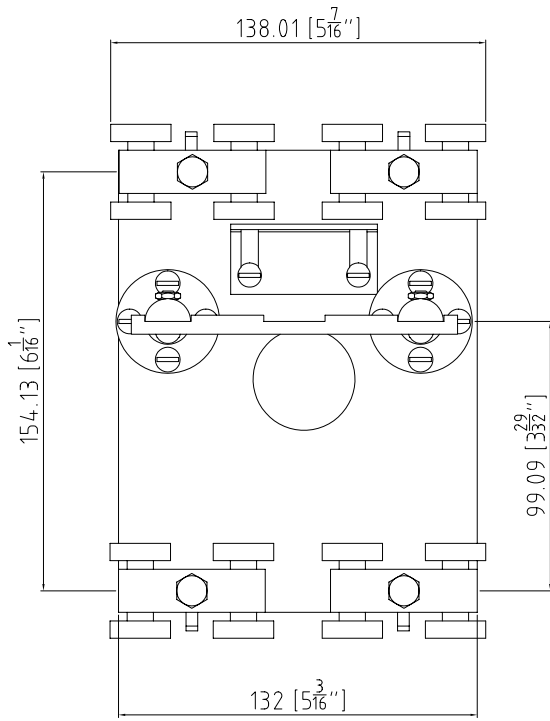
MATERIAL: Aluminio

ACABADO: SIN.

CANTIDAD: 1 pza.



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 0.1 mm	Soporte para el equipo de termorrociado	
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.16.5 HOJA : 1/1	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"
Esc.: S.E.	Movilizador de Pistola - Ensamble
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 3.16 HOJA :1/3
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

LISTA DE MATERIALES

3.16.1 Base de lámina cal. 14 (especificaciones en plano anexo)

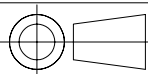
3.16.2 Carretilla aérea mod. 1400 para riel, 4 baleros No. 16

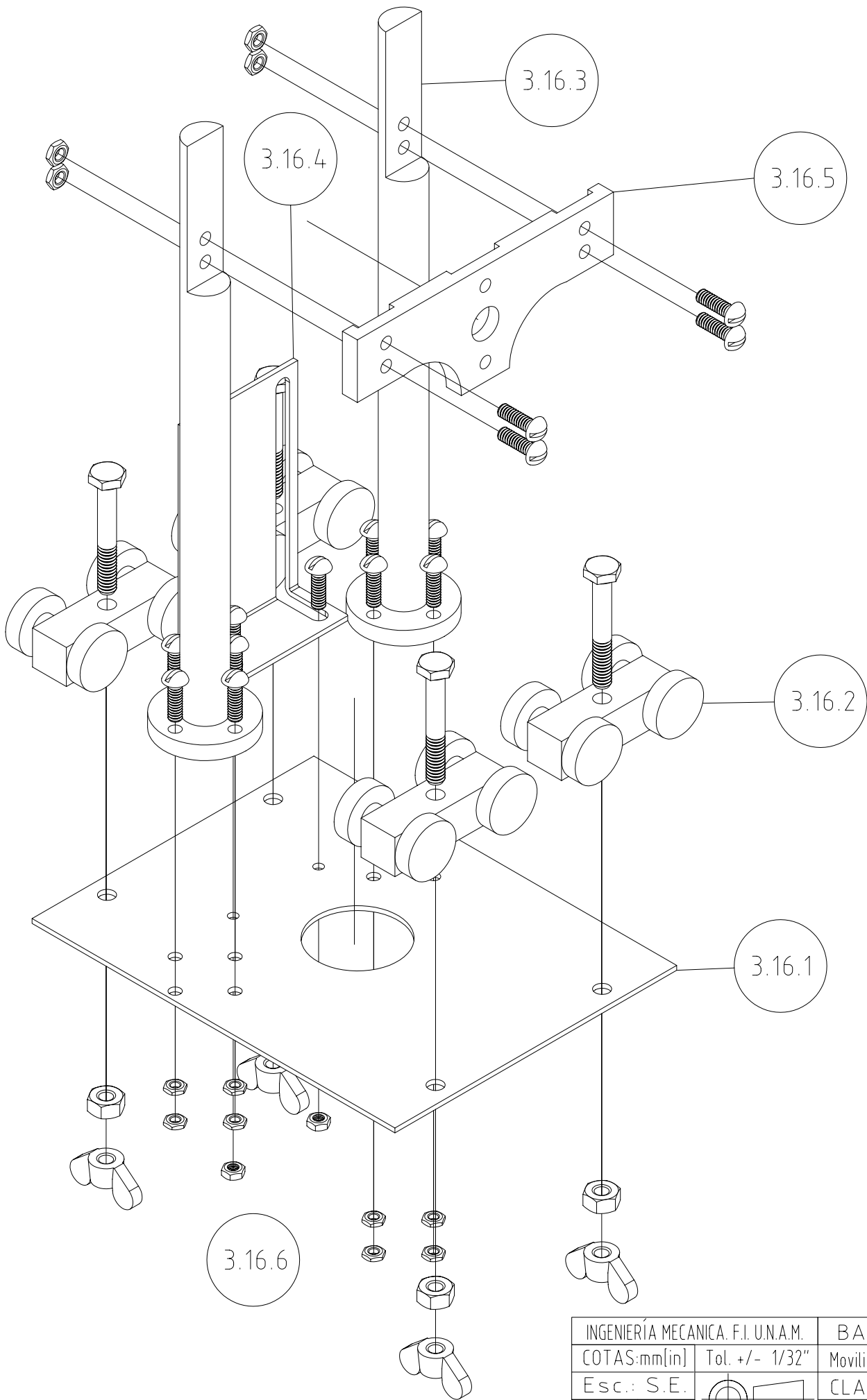
3.16.3 Poste Mat.:Al (especificaciones en plano anexo)

3.16.4 "L" de conexión (especificaciones en plano anexo)

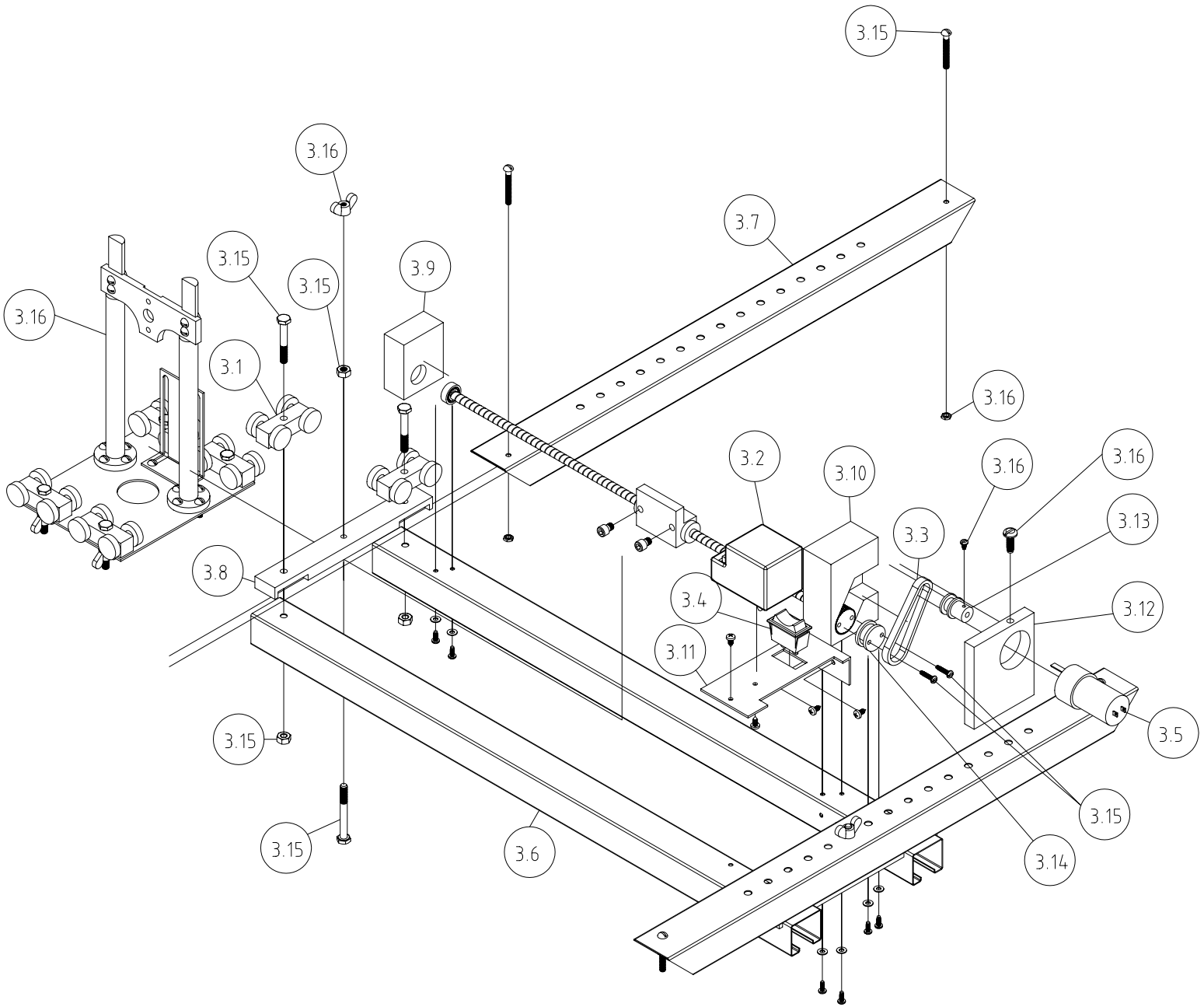
3.16.5 Soporte para pistola (especificaciones en plano anexo)

3.16.6 Tornillos y tuercas

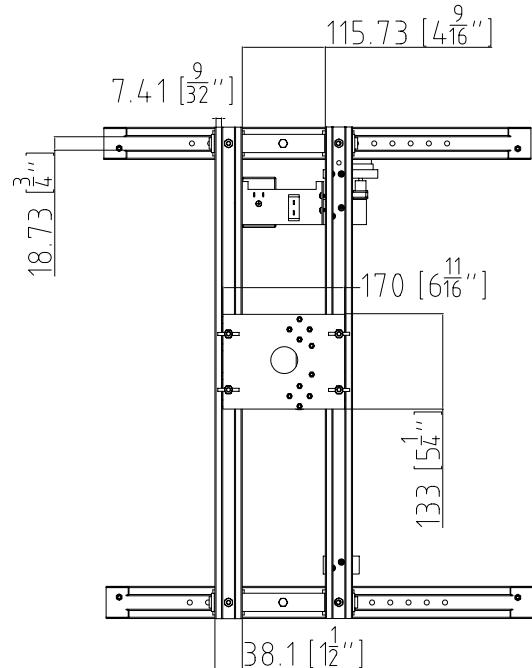
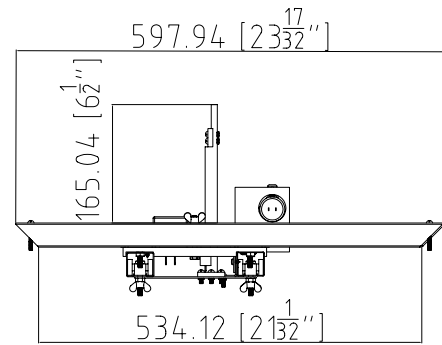
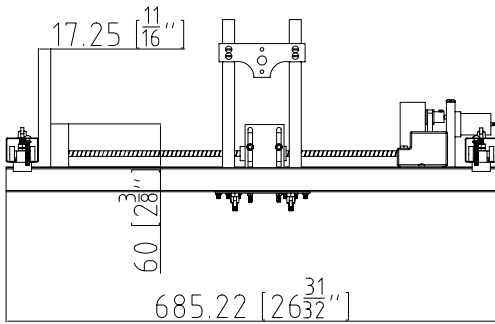
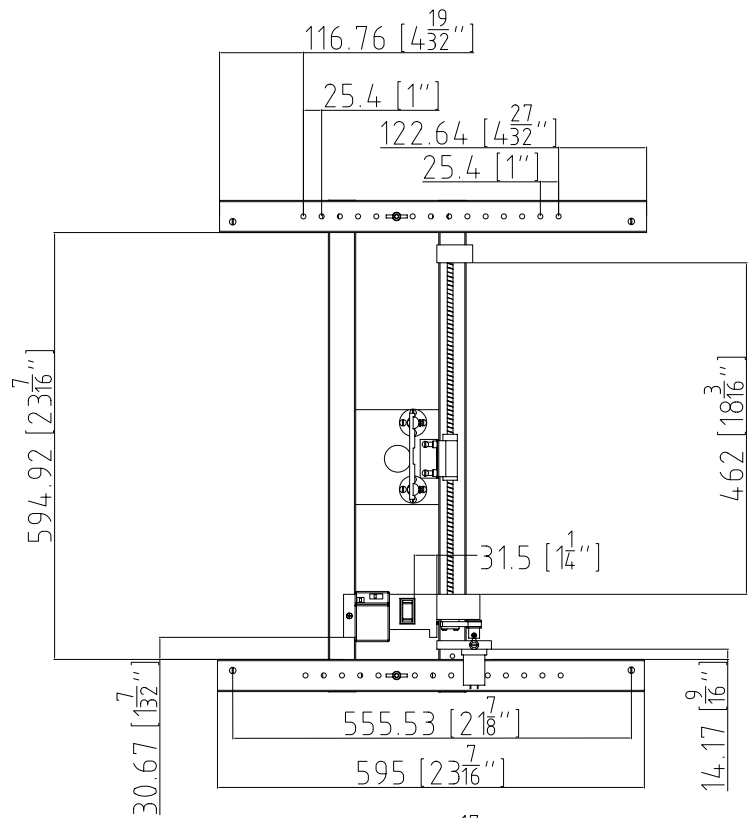
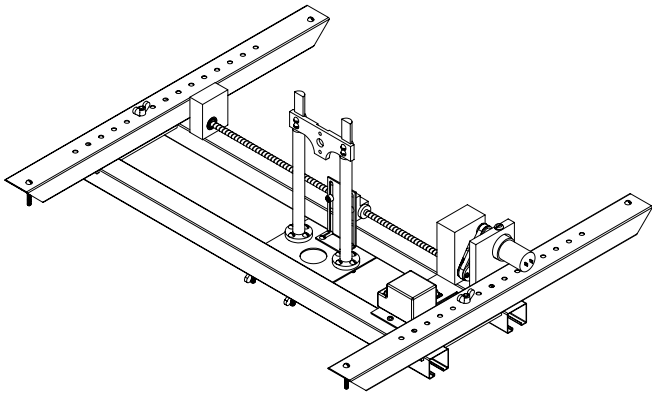
INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"	Movilizador de pistola-Lista de materiales	
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.16 HOJA :3/3	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS: mm[in]	Tol. +/- 1/32"	Movilizador de pistola - Despiece	
Esc.: S.E.		CLAVE: 3.16 HOJA :2/3	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN



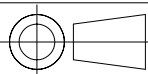
INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"
Esc.: S.E.	Ejes X-Y - Despiece
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 3 HOJA :2/3
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

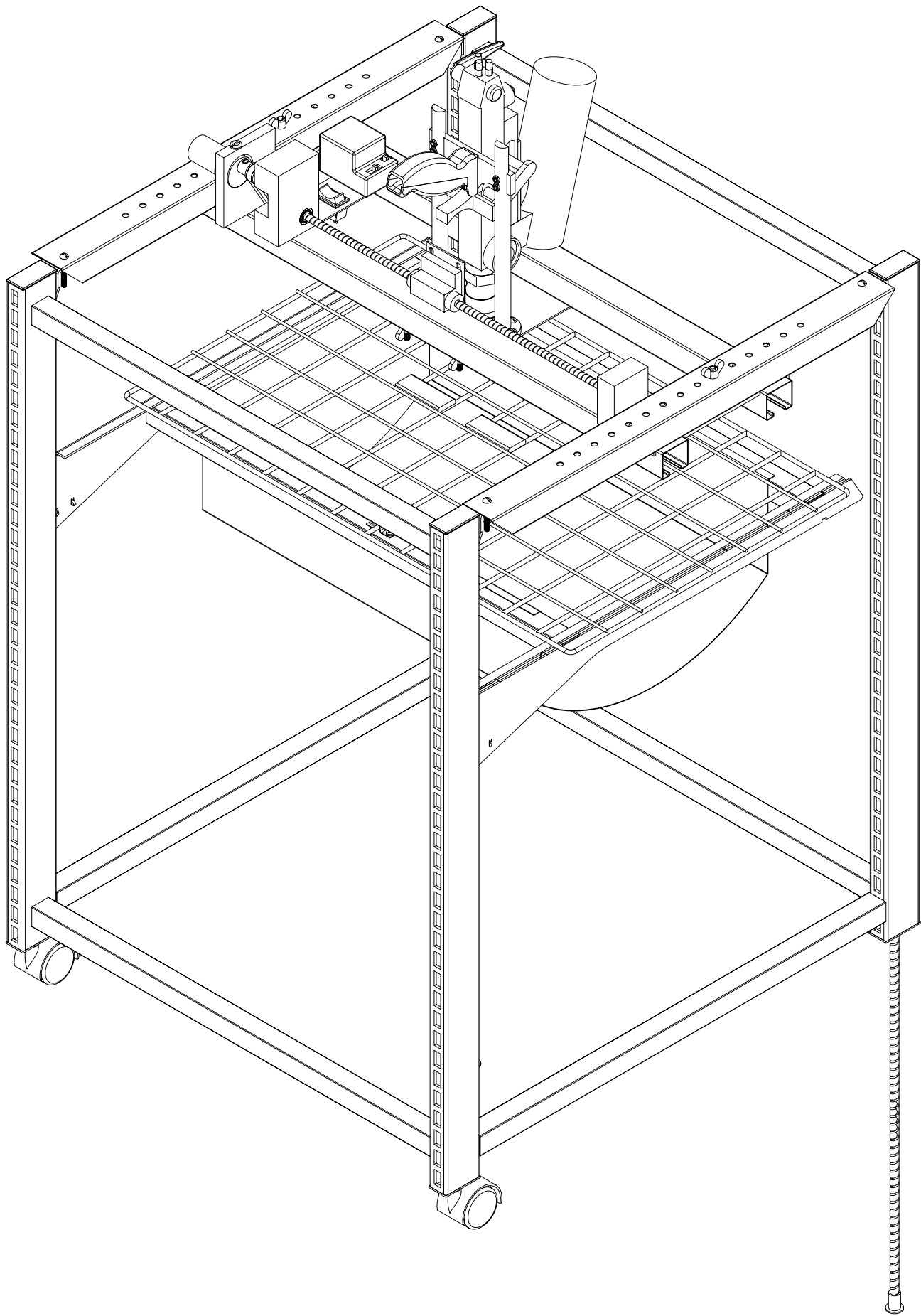


INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"
Esc.: S.E.	Ejes X-Y - Ensamble
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 3 HOJA :1/3
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

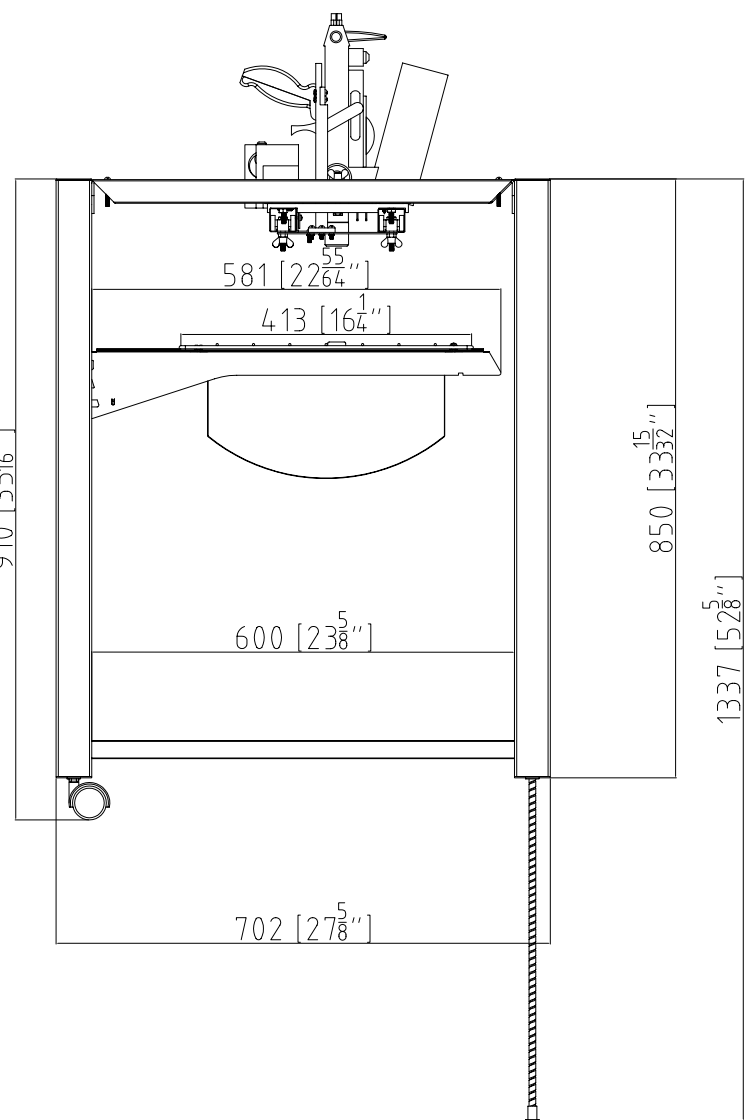
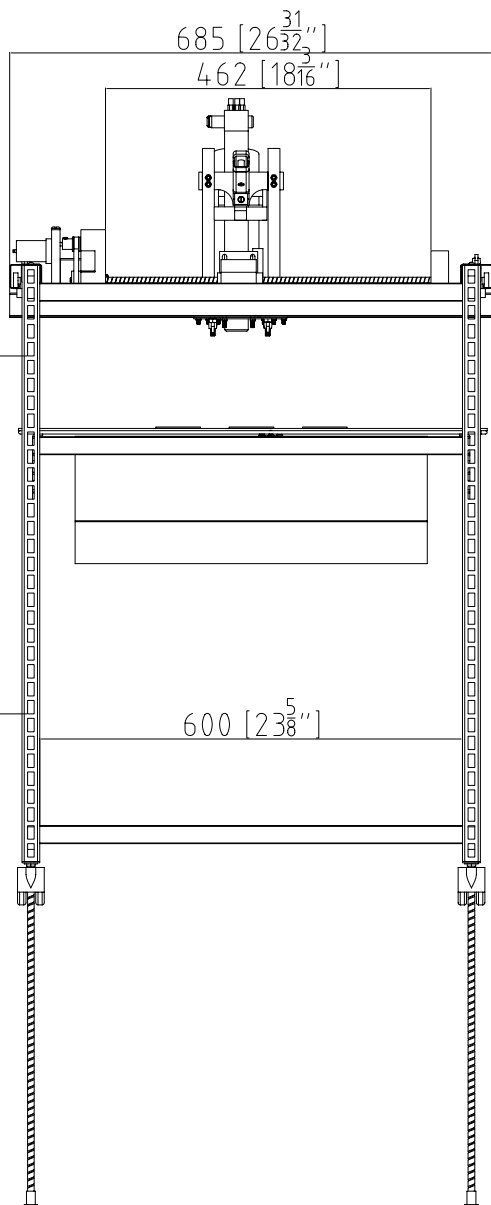
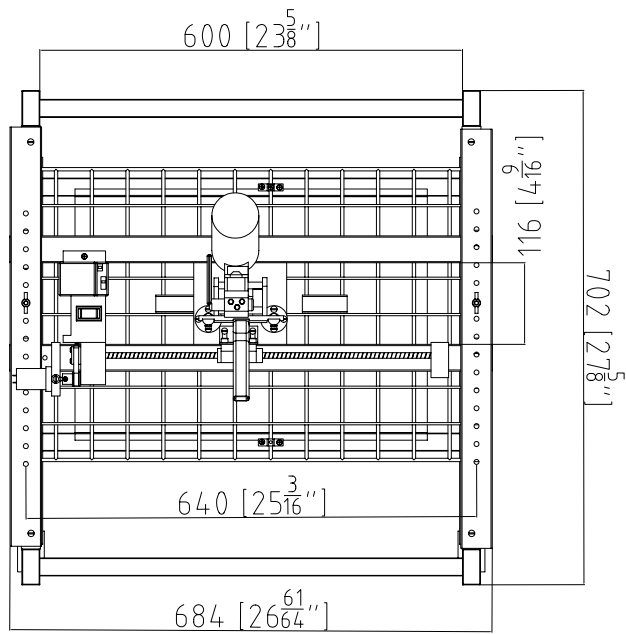
LISTA DE MATERIALES

- 3.1) Carretilla aérea mod. 1400 para riel, 4 baleros No. 16
- 3.2) Control: Eliminador de baterías comercial, voltaje máximo entregado=12 V, Corriente máxima: 500 mA. Incluye inversor de polaridad
- 3.3) Banda de Hule de 3.5 mm x 7 mm en su sección transversal
- 3.4) Interruptor Uso rudo . Ensamble a presión
- 3.5) Motorreductor (Sus especificaciones aparecen en una hoja aparte)
- 3.6) Riel Eje X de lámina cal. 20 para carretilla 1400
- 3.7) Riel Eje Y de lámina cal. 20 para carretilla 1400
- 3.8) Separador de rieles. Mat.: Al (especificaciones en plano)
- 3.9) Contrapunto Mat. : Al (especificaciones en plano)
- 3.10) Tornillo de bolas recirculantes
- 3.11) Lámina para soporte del control. Mat. acero cal. 14 (especificaciones en plano)
- 3.12) Soporte del motorreductor (especificaciones en plano)
- 3.13) Polea conductora (especificaciones en plano)
- 3.14) Polea conducida (especificaciones en plano)
- 3.15) Tornillos, tuercas y rondanas
- 3.16) Movilizador de la pistola (especificaciones en plano)

INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"
Esc.: S.E.	Ejes X-Y-Lista de materiales
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: 2 HOJA :3/3
	DIB.: MARO | REV.: MARO, RGVN

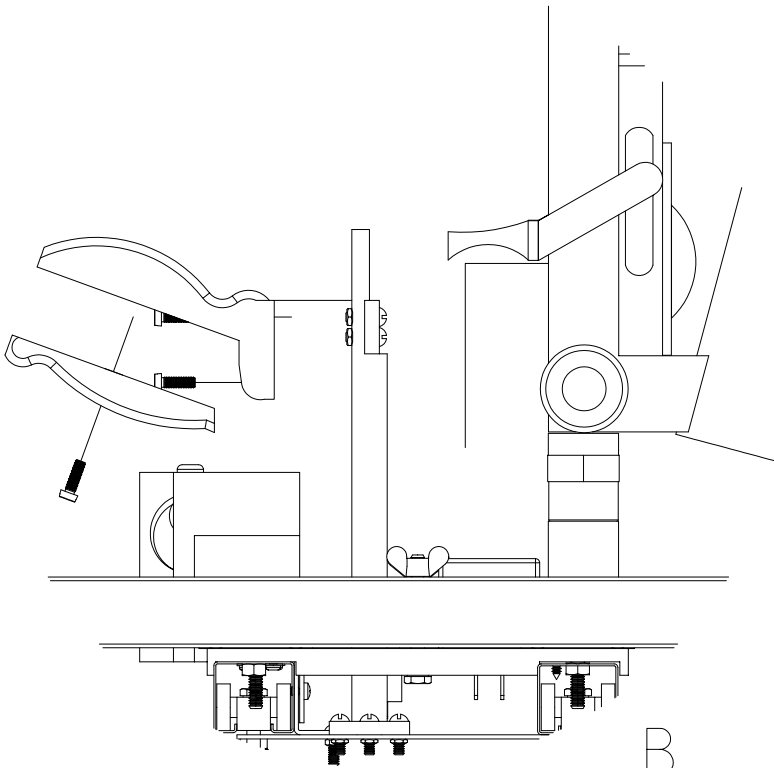


INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS: mm[in]	Tol. +/-
Esc.: S.E.	Vista Isométrica del Ensamble Final
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: A HOJA : 2/2
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

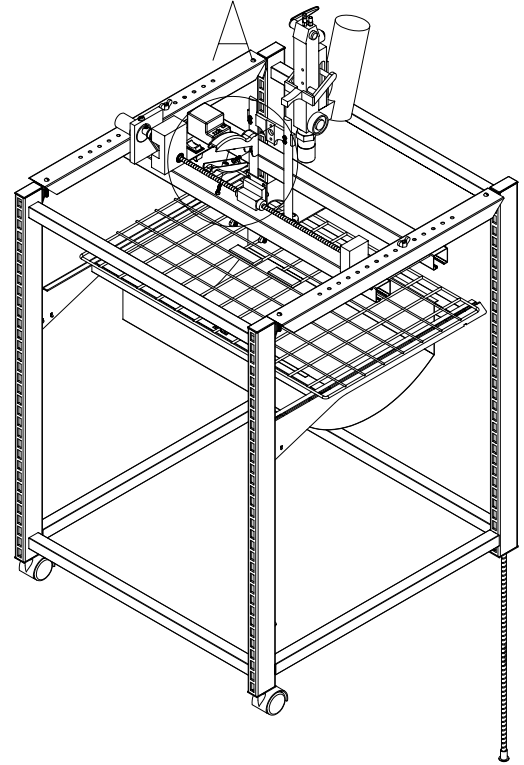
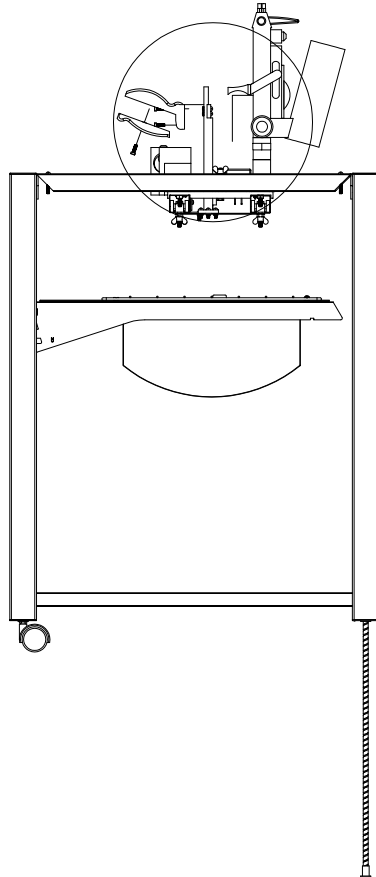


INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. U.N.A.M.		BANCO DE PRUEBAS	
COTAS:mm[in]	Tol. +/- 1/32"	Vistas del Ensamble Final	
Esc.: S.E.		CLAVE: B HOJA : 1/2	
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO	REV.: MARO, RGVN

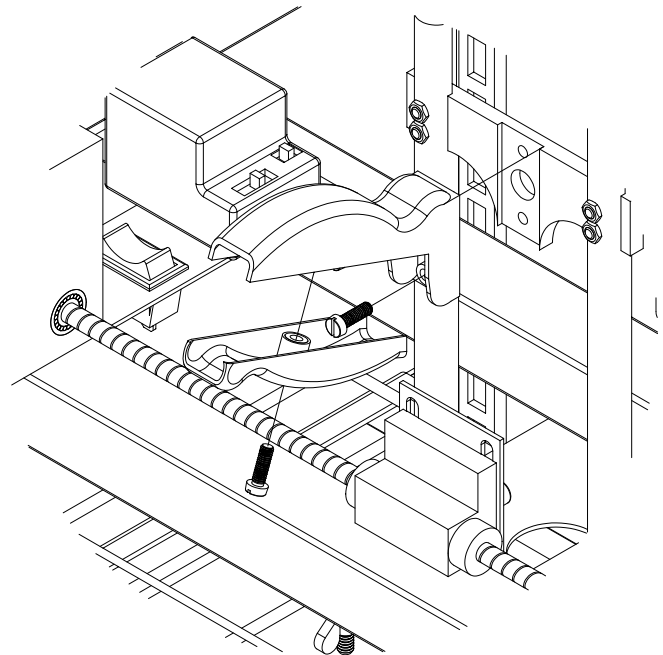
B (4:1)



B

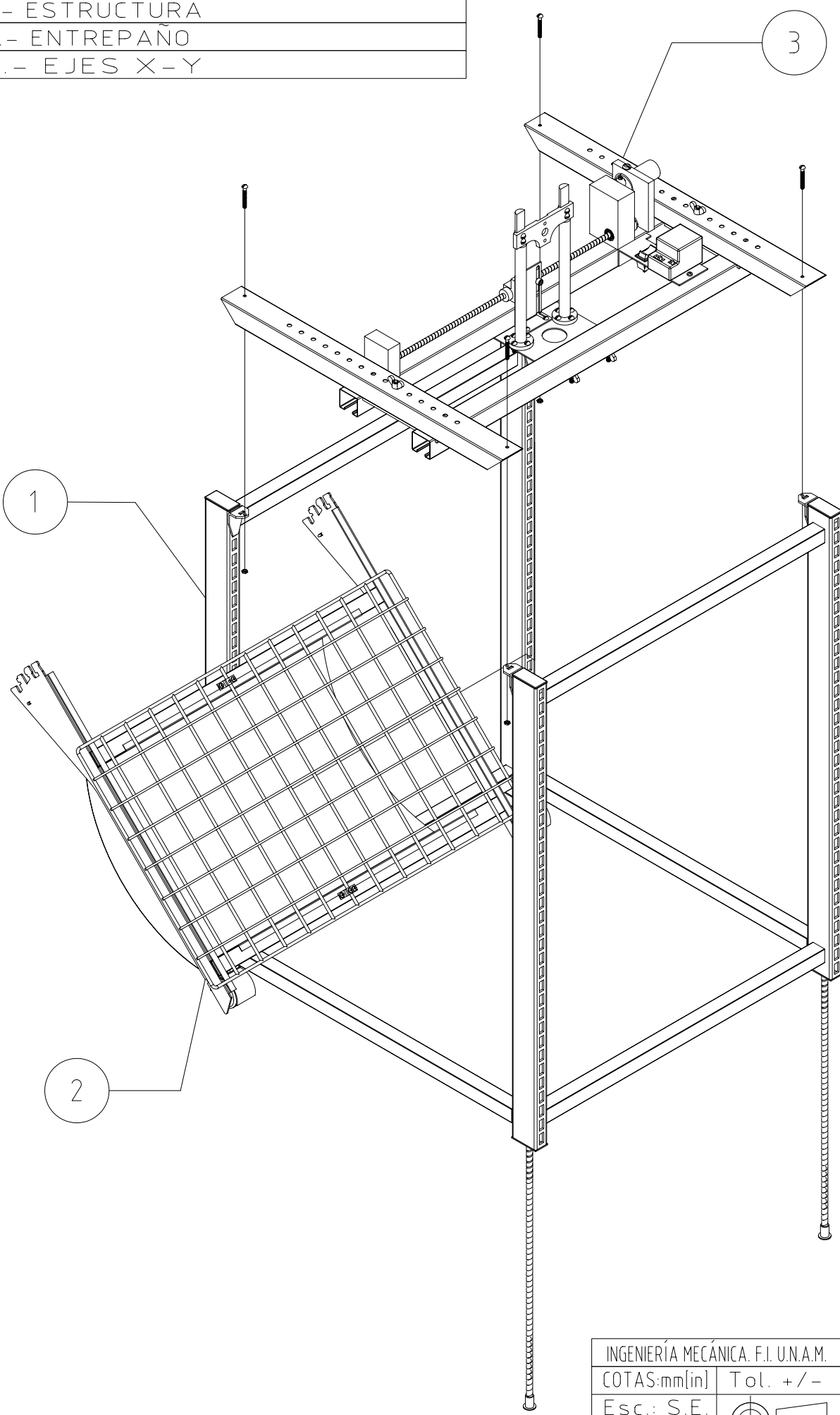


A (5:1)



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.	BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/-
Esc.: S.E.	Ensamble Pistola-Banco
Las cotas rigen al dibujo	CLAVE: C HOJA : 1/1
	DIB.: MARO REV.: MARO, RGVN

- 1.- ESTRUCTURA
- 2.- ENTREPAÑO
- 3.- EJES X-Y



INGENIERÍA MECÁNICA. F.I. UNAM.		BANCO DE PRUEBAS
COTAS:mm[in]	Tol. +/-	Ensamblés Generales
Esc.: S.E.		CLAVE: D HOJA : 1/1
Las cotas rigen al dibujo		DIB.: MARO | REV.: MARO, RGVN