



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

ROCIADO TERMICO APLICADO A MOLDES DE INYECCION
DE PLASTICO MEDIANTE DE LA TECNICA DE PROYECCION
POR FLAMA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

(AREA MECANICA)

P R E S E N T A N :

MARTINEZ MATEOS MIGUEL ANGEL

MENDOZA MUÑOZ CARLOS



DIRECTOR DE TESIS: M.I. EDUARDO GARDUÑO
DR. ARTURO BARBA PINGARRON

MEXICO, D. F.

2004



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Rociado térmico aplicado a moldes de inyección de plástico mediante de la técnica de proyección por flama.

TESIS

Que para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista:

(Área Mecánica)

Presentan: Martínez Mateos Miguel Ángel.

Mendoza Muñoz Carlos.

Director de Tesis: M.I. Eduardo Garduño.

Dr. Arturo Barba Pingarron.

AGRADECIMIENTOS:

A NUESTRA MÁXIMA CASA DE ESTUDIOS:

LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

A NUESTRA FACULTAD:

LA FACULTAD DE INGENIERÍA.

A LOS PROFESORES:

DR. ARTURO BARBA PINGARRON Y M.I. EDUARDO GARDUÑO.

**POR TODA LA AYUDA Y CONOCIMIENTOS BRINDADOS PARA PODER
TERMINAR ESTE TRABAJO DE TESIS.**

Agradecimientos: Martínez Mateos Miguel Ángel.

A Dios: Por darme la oportunidad de vivir, ayudarme en los momentos más difíciles de mi vida y darme la fuerza de seguir adelante.

A la memoria de mi Padre: José Trinidad Martínez Martínez. Por darme el apoyo en el transcurso de mi carrera, por ser un ejemplo como padre de familia, una persona trabajadora y respetada, gracias donde quiera que estés.

A mi Madre: Evarista Mateos Bermejo. Por ser una madre comprensiva, por los consejos que me distes y siempre me apoyaste en las decisiones que tomara, además de ser una persona de carácter fuerte y no dejaras que tomara un mal camino, con todo cariño y respeto esta tesis esta dedicada para ti.

A mis Hermanas: Sonia y Carmen. Por ayudarme tanto moral y económicamente durante mi carrera y demostrarles que con dedicación y empeño se pueden lograr las metas que uno se propone.

A mi Tío: Agustín Mateos, **A mi Abuela:** Gabina Bermejo, **A mis Tías:** Susana y Anita. Por los consejos y el apoyo incondicional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México: Por abrirme sus puertas y pertenecer a la máxima casa de estudios.

A los Profesores: DR. Arturo Barba Pingarron y MI. Eduardo Garduño. Por la ayuda y conocimientos brindados durante la tesis.

A Miguel Hernández: Por su ayuda en la etapa final de la tesis y brindarnos su experiencia y conocimientos en las máquinas convencionales.

A mi Compañero de tesis: Carlos Mendoza Muñoz. Por ayudarme en la realización de la tesis.

Agradecimientos: Carlos Mendoza Muñoz

A Dios:

Por darme todas las fuerzas para seguir adelante en mis estudios y no dejarme caer en los momentos más difíciles, por todo lo bueno y lo malo que me ha atorgado en esta vida ya que he aprendido demasiado de esas experiencias y que me han enseñado a valorar “*Que lo que más nos cuesta trabajo en esta vida, es lo que más apreciamos*”.

A mi Madre: *Maria de Lourdes Muñoz Osornio.*

Por todo el cariño, amor y ternura que siempre me has procurado, por los valores y la educación que me has brindado desde que falleció mi padre y además por todos tus “*anhelos y deseos*” de sacarnos adelante en la vida para poder ser alguien. “*Esto es por ti*”.

A mi Tía: *Trinidad Mendoza Saucedo.*

Por tu cariño y amor incondicional, además de tu perseverancia y apoyo para que yo siguiera estudiando, este es un obsequio a cambio de todos los momentos difíciles por los que has pasado.

A mi Abuela: *Aurora Saucedo.*

Por todo tu amor y ternura que siempre me otorgas.

A la memoria de mi Padre: *C. Carlos Mendoza Saucedo.*

Para ti, que en algún lugar yo sé que me estas observando y cuidando.

A mis Hermanos: *Gerardo y Karen.*

Porque todo lo que queremos lo podemos alcanzar con mucha perseverancia y esfuerzo, lo importante es no perder la Fe en Dios y en uno mismo.

A Miguel Hernández:

Por tu valiosa aportación en la etapa final de este proyecto, además de tu apoyo y confianza para lograr que no nos desesperáramos para terminar la tesis, muchas gracias.

A mi Compañero de Tesis: *Miguel Ángel Martínez Mateos.*

Gracias por haberme tenido confianza para escogerme como compañero de tesis, además de paciencia durante todo el trabajo realizado. *Mateo* muchas gracias.

OBJETIVOS:

- Aplicar recubrimientos mediante la técnica de proyección térmica para la recuperación y mejorar el rendimiento de los moldes de inyección de plásticos.
- Aplicar sobre un acero de bajo contenido de carbono un recubrimiento mediante la técnica de proyección térmica, para valorar si es factible mejorar sus propiedades superficiales y evaluar las posibilidades de sustituir aceros de más alto costo.

HIPÓTESIS:

- Al aplicar un recubrimiento por proyección térmica, es factible utilizar un material económico(acero de bajo carbono), para que pueda adquirir propiedades semejantes a las de un acero para herramienta utilizado en la elaboración de moldes de inyección de plástico, después de aplicarle dicho recubrimiento.

Rociado térmico aplicado a moldes de inyección de plástico mediante de la técnica de proyección por flama.

ÍNDICE TEMÁTICO:

CAPITULO 1

Generalidades sobre plásticos y el proceso de inyección.

1.1 Generalidades.	1
1.2 Origen de los plásticos.	1
1.3 Clasificación de los plásticos.	2
1.4 Materiales termoplásticos.	3
1.5 Nomenclatura de los materiales plásticos.	5
1.6 Importancia de los plásticos dentro de la industria.	6
1.7 Propiedades de algunos plásticos utilizados en la industria.	18
1.8 El proceso de inyección.	19
1.8.1 Moldeo por inyección.	19
1.8.2 Elementos de los ciclos de moldeo.	23
1.8.3 Ventajas del moldeo por inyección.	24
1.8.4 Inconvenientes del moldeo por inyección.	24

CAPITULO 2

Antecedentes sobre diseño y fabricación de moldes de inyección.

2.1 Introducción.	27
2.2 Consideraciones sobre materiales.	28
2.2.1 Medio ambiente.	28
2.2.2 Características eléctricas.	29
2.2.3 Características químicas.	29
2.2.4 Factores mecánicos.	29
2.2.5 Economía.	30
2.3 Consideraciones de diseño.	30
2.3.1 Aspecto.	30
2.3.2 Limitaciones de diseño.	31

2.4 Consideraciones de producción.	31
2.4.1 Proceso de fabricación.	31
2.4.2 Contracción de material.	32
2.4.3 Tolerancias.	32
2.5 Moldes de inyección.	33
2.5.1 Introducción.	33
2.5.2 Clasificación de moldes.	33
2.5.3 Moldes sencillos o múltiples.	33
2.5.4 Materiales para los moldes de inyección.	34
2.5.5 Elementos del molde de inyección.	35
2.5.6 Enfriamiento del molde.	38
2.5.7 Respiración del molde.	38
2.5.8 Diseño básico de moldes de inyección.	39
2.5.9 Problemas que se pueden presentar durante la elaboración de los moldes.	40

CAPITULO 3

Fundamentos del rociado térmico.

3.1 Introducción.	42
3.2 Materiales usados para recubrimientos por rociado térmico.	43
3.3 Métodos para la producción de polvos.	44
3.4 Métodos de caracterización de polvos.	47
3.4.1 Tamaño de grano.	47
3.4.2 Análisis químico y de fases.	47
3.4.3 Composición química.	48
3.4.4 Distribución de elementos.	48
3.4.5 Análisis de fases.	48
3.4.6 Morfología de los granos.	48
3.4.7 Densidad aparente y facilidad de flujo.	49
3.5 Tratamientos previos al rociado térmico.	50
3.6 Técnicas de rociado térmico.	58
3.6.1 Rociado térmico por flama (FS).	58
3.6.2 Rociado térmico por plasma atmosférico(APS).	64
3.6.3 Rociado térmico por arco (AS).	66
3.6.4 Rociado térmico por detonación.	67
3.6.5 Rociado térmico de alta velocidad (HVOF).	70
3.6.6 Rociado térmico por plasma en vacío (LPPS).	71
3.7 Aplicaciones de los recubrimientos.	77
3.8 Ejemplos de aplicación de los recubrimientos por rociado térmico en diversas industrias.	86

CAPITULO 4

Selección de materiales.

4.1 Substrato.	91
4.1.1 Procedimiento realizado para el remaquinado del molde.	91
4.2 Polvo (Recubrimiento).	94

CAPITULO 5

Experimentación.

5.1 Granallado de probetas.	96
5.1.1 Material y equipo utilizado para el granallado de las probetas.	96
5.1.2 Descripción del proceso en el granallado.	98
5.2 Rociado térmico de probetas.	100
5.2.1 Equipo utilizado.	100
5.2.2 Descripción del proceso en el rociado térmico.	101
5.2.3 Resultados de dureza y espesores obtenidos en el proceso de experimentación.	106
5.3 Granallado y rociado térmico en placa de acero 1018 con la cavidad seleccionada.	109
5.4 Resultados de las pruebas experimentales.	111

CAPITULO 6

Presentación y discusión de resultados.

6.1 Granallado y rociado térmico del molde.	112
6.2 Proceso de inyección con el molde recubierto.	125

CAPITULO 7

Conclusiones.	133
Sugerencias para un trabajo posterior.	135

ANEXO 1

<i>Factores que afectan el desempeño de un recubrimiento obtenido por proyección térmica.</i>	136
<i>Variables determinantes del proceso de rociado.</i>	137
<i>Características requeridas de un recubrimiento protector.</i>	140

ANEXO 2

<i>Microestructuras de diferentes materiales obtenidas por los diversos métodos de proyección térmica.</i>	142
--	------------

BIBLIOGRAFÍA.	147
----------------------	------------

CAPITULO 1

GENERALIDADES SOBRE LOS PLÁSTICOS Y EL PROCESO DE INYECCIÓN.

1.1 GENERALIDADES:

Los plásticos desde su aparición han tenido una influencia revolucionaria, debido a una serie de propiedades físicas y químicas que los hacen únicos y que permiten moldearlos a temperaturas relativamente bajas, además de proporcionarles una gran resistencia. Los materiales plásticos, a pesar que se consideran impermeables, no lo son en todos los casos, y presentan una amplia gama de valores de permeabilidad.

¿Qué es un plástico?

Las materias plásticas son sustancias orgánicas caracterizadas por su estructura macromolecular y polimérica. Un polímero es una molécula muy grande formada por la unión de muchas moléculas más pequeñas llamadas monómeros. Para que un compuesto sea un polímero deberá tener al menos 100 meros y de acuerdo a su composición química tendrán diferentes propiedades de las cuales se derivan sus aplicaciones.

En otras palabras: Los plásticos son materiales susceptibles de moldearse mediante procesos térmicos, a bajas temperaturas y presiones. Presentan una serie de propiedades físicas y químicas muy útiles en la producción de diversos artículos, como por ejemplo en la fabricación de envases y embalaje de multitud de productos, etc.

1.2 ORIGEN DE LOS PLÁSTICOS.

Los plásticos se pueden clasificar en naturales y sintéticos. Como ejemplo de un plástico natural se puede hablar del hule que se obtiene de la secreción del árbol del guayule, de la resina y brea usadas en la industria de pinturas que también proviene de secreciones arbóreas, además de la goma laca y la goma de caucho.

Los plásticos sintéticos empiezan con los derivados del algodón o celulósicos, que son los que inician esta revolución industrial, para llegar a nuestros días a los plásticos derivados del petróleo y del gas natural y que son producidos en la industria petroquímica.

El nylon y el polietileno son ejemplos de plásticos sintéticos, formados por un proceso de polimerización, que consiste en la unión de varias moléculas llamadas monómeros. Esta unión se realiza por medio de un catalizador y al compuesto de este tipo se le llama polímero.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS.

Los plásticos se pueden clasificar en dos grandes grupos de acuerdo a las propiedades que presenta el producto final, esta clasificación es la siguiente: **Termoplásticos** y **Termoestables**.

TERMOPLÁSTICOS:

Estos plásticos se vuelven suaves y deformables al calentarse, por lo cual pueden moldearse y pueden ser reutilizados mediante su granulación para un posterior proceso de remoldeo debido a que no se forman productos secundarios durante su procesamiento.

TERMOESTABLES:

Son aquellos plásticos en los que durante su proceso de moldeo ocurre una reacción química de polimerización liberando un producto secundario, de tal manera que al terminar este proceso, estos materiales ya no son susceptibles de una nueva fusión, debido a que se vuelven duros y rígidos al ser calentados.

Los termoestables se agrupan en dos grandes categorías: **rígidos** y **flexibles**. Los *termoestables rígidos* encuentran su aplicación en entornos de mucho calor ya que no se ablandan y se carbonizan a altas temperaturas. Además como están fuertemente ligados químicamente, son también resistentes al ataque de disolventes.

Los *termoestables flexibles* tienen una historia larga, desde el punto de vista químico. Uno de los primeros investigadores de estos materiales fue Goodyear quien encontró la forma de provocar la formación de reticulaciones entre las moléculas de caucho, para posteriormente usarlo en la fabricación de los neumáticos. Otro grupo de termoestables flexibles son los basados en Uretano por ejemplo: las espumas para los asientos de los coches, sofás, muebles y alcoholes están hechas de poliuretano. Los termoestables rígidos y flexibles no son reciclables ni reprocesables, a diferencia de los termoplásticos.

ELASTOMEROS:

Los elastómeros se forman sin la adición de diluyentes ni plastificantes y, dependiendo de su naturaleza química pueden ser *termoestables* o *termoplásticos*.

Ejemplos: Poliuretanos nítricos, silicones y butadieno-estirenos.

Este grupo de materiales posee una estructura molecular que le proporciona gran elasticidad. Los hules sintéticos o elastómeros después de haber sido deformados por la aplicación temporal de una fuerza ligera regresan rápidamente a sus dimensiones iniciales.

Tabla 1.1 Comparación entre termoplásticos y termoestables

Termoplástico	Termoestables
Endurecen al solidificar el material fundido.	Endurecen por reacción química, con frecuencia por formación de enlaces cruzados de las cadenas.
Estados sólido-líquido reversible.	El líquido se convierte irreversiblemente en un sólido.
Es posible la recuperación de los desperdicios.	No pueden recuperarse directamente los desperdicios.
Hay una temperatura máxima de uso.	Muchas veces pueden soportar altas temperaturas.
Al tratar el material fundido se orientan por lo común, las cadenas del polímero.	Pueden manejarse con baja orientación.

Por lo anteriormente mencionado, los programas de reciclaje actuales para artículos de consumo concentran su atención en materiales termoplásticos, que son reprocesables.

1.4 MATERIALES TERMOPLÁSTICOS.

Debido a su comportamiento, la mayoría de los materiales muestran diferencias demasiado grandes para permitir una consideración ideal. Por esta razón se deben seguir algunas recomendaciones:

FORMA DE SUMINISTRO.

El material termoplástico llega generalmente al mercado en forma de granaza. La forma y el tamaño de los diferentes tipos de grano es distinto según el tipo de material. La forma de suministro de la granaza viene determinada en primer lugar por las propiedades de elaboración, pero puede ser modificada de acuerdo a las consideraciones técnicas de producción del fabricante.

Para una buena elaboración de los productos se debe tener en cuenta que la forma de suministro sea completamente pura, sin pegajosidades de la granaza. La forma y el tamaño de los granos tiene que estar ajustado para que se garantice la disgregación termoplástica óptima teniendo en cuenta los diversos métodos de plastificación propios del proceso. El volumen aparente de apilado o vibración de la granaza es de importancia para su elaboración, no sólo en máquinas con dispositivos dosificadores volumétricos. Es deseable aquí que la forma y tamaño de los granos sean lo más constantes posibles y mantengan una relación que limite al mínimo los espacios vacíos en el volumen aparente de caída.

Finalmente la granaza tiene que estar cortada, sin presentar rebabas en las superficies de corte, que pueden provocar la formación de puentes en las tolvas de las máquinas de elaboración, interrumpiendo así el flujo del material.

Por otro lado la superficie de la granaza debe de ser tal que, análogamente a las propiedades higroscópicas de cada material, limite a un mínimo la absorción de humedad ya que una fuerte absorción de agua produce un desarrollo de vapor en el curso de la disgregación del material, en el cilindro de plastificación de la máquina influyendo en los resultados de la producción.

SUGERENCIAS RESPECTO AL MATERIAL.

El material tiene que disgregarse, con ayuda de los dispositivos de uso general, a una temperatura dentro de la zona de fusión plástica que garantice el llenado uniforme de las cavidades del molde.

La masa de inyección tiene que comportarse de forma estable respecto a las influencias térmicas y no presentar síntomas de descomposición química de ningún tipo durante el proceso de elaboración.

Si la masa de inyección es sometida a temperaturas excesivas dentro del cilindro calefactor o, se produce una avería en el curso de la producción, se dilata excesivamente el tiempo de permanencia del material en el cilindro a temperatura normal, con lo cual se observará en los plásticos de reducida estabilidad térmica lo que se conoce como quemado.

Los síntomas anteriores se manifiestan en la pieza inyectada en forma de burbujas o se modifica completamente el color de la pieza, impidiendo su posible utilización (Esto es más observable en los materiales transparentes o claros).

Otras formas de insuficiente estabilidad térmica del material se manifiestan en la separación de componentes químicos que tienen a menudo carácter agresivo atacando al cilindro y el molde. Adicionalmente puede formarse vapores nocivos que provoquen un mal olor o, una irritación a las vías respiratorias del personal encargado.

1.5 NOMENCLATURA DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS.

Termoplásticos

NOMBRE	ABREVIATURA (en inglés)
Polimerizados acrilonitrilo-butadieno-estireno	ABS
Acetato de celulosa	CA
Acetato butirato de celulosa	CAB
Propionato de celulosa	CP
Poliestireno expandido	EPS
Polimerizado de PVC en emulsión	E-PVC
Copolímeros etileno-acetato de vinilo	EVA
Polietileno de alta densidad	HDPE
Polietileno de baja densidad	LDPE
Polietileno densidad media (no normalizada)	MDPE
PVC polimerizado en masa	M-PVC
Poliamida	PA
Polibutileno	PB
Policarbonato	PC
Polietileno	PE
Tereftalato de polietileno	PET
Polipropileno	PP
Poliestireno	PS
Copolímeros estireno-acrilnitrilo	SAN
Politetrafluoretileno (Teflón)	PTFE
Acetato de polivinilo	PVAC
Policloruro de vinilo	PVC
Copolímeros cloruro-acetato de vinilo	PVCAC
Cloruro de polivinilideno	PVDC
Copolímeros estireno-butadieno = Poliestireno antichoque	SB
Poliésteres	

Termoestables

PLÁSTICO	ABREVIATURA
Resinas de colada melamina-formaldehído	MF
Resinas de moldeo de fenol-formaldehído	PF
Polimetil-metacrilato	PMMA
Polimetil pentano	PMP
Poliacetal	POM
Poliuretanos	PU
Resinas de moldeo de urea-formaldehído	UF
Hule natural	
Hule sintético	

1.6 IMPORTANCIA DE LOS PLÁSTICOS DENTRO DE LA INDUSTRIA.

Los plásticos son muy importantes dentro del ramo industrial ya que ofrecen muchas ventajas y una gran diversidad de aplicaciones.

Algunas de las ventajas y desventajas que pueden presentar este tipo de materiales en general son las siguientes:

Ventajas:

- Alta resistencia eléctrica.
- Baja constante dieléctrica.
- Baja conductividad térmica.
- Alta relación de resistencia a la tracción a peso.
- Facilidad de formado.
- Bajo costo en el formado.
- Pocos o ningún problema de corrosión.
- Baja proporción de costo de material / producción.
- Baja densidad.

Desventajas:

- Baja resistencia a la compresión y al esfuerzo cortante.
- Limitaciones en el uso prolongado a temperaturas elevadas.
- Envejecimiento y efectos de la intemperie en ciertos climas.
- Fatiga en condiciones de esfuerzo por carga.

Debido a estas características los plásticos en general pueden ser utilizados en los siguientes productos:

- Productos alimenticios y bebidas.
- Productos químico – industriales.
- Productos farmacéuticos y cosméticos.
- Como Biomateriales de uso cotidiano en los centros de salud.
- Como Biomateriales para reemplazar miembros u órganos en el ser humano.
- Refacciones y partes automotrices.
- Componentes electrónicos.
- Revestimientos de cables.
- Partes de computadora.
- Herramientas.
- Tuberías.
- Mercancías diversas.

A continuación se mencionan algunos ejemplos específicos de Termoplásticos y Termoestables los cuales involucran algunas de las características anteriormente mencionadas.

Termoplásticos:

Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)

Ventajas: Facilidad de fabricación y coloración, alta resistencia al impacto con tenacidad y rigidez, buenas propiedades eléctricas, excelente adherencia con recubrimientos metálicos, buena resistencia química, absorción de humedad muy baja.

Desventajas: Escasa resistencia a disolventes, baja resistencia dieléctrica, baja temperatura de servicio continuo.

Aplicaciones: Los materiales de ABS se caracterizan por su resistencia a sustancias químicas, calor e impacto. Se utiliza para carcasas de aparatos, maletas ligeras, tuberías, cajas de herramientas, etc.

Policarbonato (PC)

Ventajas: Alta resistencia al impacto, excelente resistencia a la fluencia, estabilidad adimensional muy buena.

Desventajas: Altas temperaturas de tratamiento, sujeto a agrietamiento por disolventes, requiere estabilización con ultravioleta, escasa resistencia a álcalis.

Aplicaciones: Se utiliza como lentes, faros, componentes de aparatos y fundas para herramientas, cascos de seguridad, etc.

Polietileno (PE)

Ventajas: Excelentes propiedades dieléctricas, resistencia a la humedad, resistencia química muy buena.

Desventajas: Dilatación térmica alta, resistencia a la intemperie insuficiente, dificultad para unión, inflamable.

Aplicaciones: Se utiliza para recubrir papel, cartón y telas para mejorar su resistencia a la humedad y otras propiedades, fabricación de juguetes, recipientes para congelados, como cubierta para alambres y cables eléctricos.

Termoestables:

Urea-Formaldehído (UF)

Ventajas: Dureza, resistencia al rayado, autoextinguible, buena resistencia a los disolventes.

Desventajas: Escasa resistencia a la oxidación a largo plazo, atacado por ácidos y bases fuertes, emisión de gases de las espumas y plásticos parcialmente polimerizados o sin curar.

Aplicaciones: En la industria textil, papelera y de recubrimientos superficiales como se pueden ver en refrigeradores, lavadoras, estufas, etc.

Melamina-Formaldehído (MF)

Ventajas: Dureza, resistencia al rayado, autoextinguible, buena resistencia a los disolventes, amplia gama de colores.

Desventajas: Escasa resistencia a la oxidación a largo plazo, atacado por ácidos y bases fuertes.

Aplicaciones: Se utiliza para recubrimientos superficiales y extractos decorativos, se emplea a escala comercial para acabados textiles, etc.

Poliuretano (PU)

Ventajas: Alta resistencia a la abrasión, buena capacidad a alta temperatura, amplia variedad de estructura molecular, los prepolímeros se espuman fácilmente.

Desventajas: Escasa capacidad térmica, tóxico, escasa resistencia al intemperie, susceptible al ataque de disolventes.

Aplicaciones: Se emplean como acabados transparentes o pigmentados para uso doméstico, industrial o marino, las espumas semirrígidas encuentran aplicaciones como materiales absorbentes de energía, en amortiguadores, reposabrasos, etc.

Las aplicaciones de los plásticos en algunos productos son los siguientes:

<i>Productos alimenticios y bebidas:</i>
-Bandejas de poliestireno clasificados como pequeños envases para productos como gelatinas.
-Vasos de yogurt y productos similares de las industrias lácteas.
-Botones para especias inyectados en poliestireno o PVC rígido para mejor hermeticidad.
-Cubos para embalaje inyectados en polietileno, ya que deben resistir caídas y choques. Se utilizan en embalajes de mayonesa, leche, cerveza, etc.
-Para bebidas sin dióxido de carbono o con muy poca cantidad del mismo se recurre además del PVC al HDPE y al poliestireno antichoque.
-En bebidas instantáneas en polvo, como cacao o café soluble también se usa el PVC.

<i>Productos químico-industriales:</i>
-En aceites para motores y anticongelantes para radiadores se emplea generalmente HDPE (polietileno de alta densidad), ya que se hincha ligeramente, tras un largo tiempo de almacenaje, sin perjudicar la calidad del bote ni mucho menos la del aceite.
-Otros aceites son aquellos destinados a la lubricación de maquinaria, etc. los cuales se envasan preferentemente en PVC o acetato de celulosa.

<i>Cosméticos:</i>
-Para envases de productos cosméticos son de gran importancia dos tipos de exigencias: La transparencia e insensibilidad frente a aceites, aromas y alcoholes.
-El material se elige según el tipo de mercancía y la transparencia deseada. Se emplean principalmente poliolefinas (HDPE, LDPE y PP) y PVC.

<i>Productos Farmacéuticos:</i>
-Los tubos para cremas y medicamentos en forma de pomadas se elaboran en polietileno, polipropileno o PVC.
-Medicamentos líquidos son envasados en botellas de PE, PVC o PP.
-Para píldoras o tabletas se emplean frascos obtenidos en parte por inyección – soplado que puede ser de PVC o poliestireno.

Como Biomateriales para reemplazar miembros u órganos en el ser humano [1]:

LOCALIZACIÓN	DISPOSITIVO	ETIOLOGÍA	MATERIALES
OJO	Lente intraocular Lentes de contacto Vendaje corneal	Cataratas Problemas de la visión	Acrílico (polimetilmetacrilato) silicona (Sil), hidrogeles, silicona-acrilatos, colágeno
ÓRGANOS SEXUALES	Prótesis mamarias	Mastectomía subcutánea, subdesarrollo o asimetría de mamas	Silicona
	Stent vaginal	Reconstrucción por enfermedad o ausencia congénita	Silicona, PE
	Implante	Trompas de falopio	Silicona
	Implante de pene	Impotencia eréctil	Silicona, PE
ESQUELETO	Placa craneal	Traumatismo	Acrílico, Ti (malla)
	Reparación de huesos		Hidroxiapatita, acrílico
	Tendones artificiales	Tendonitis, traumatismo	Silicona, poliéster
	Articulaciones de rodilla y dedos	Artritis, traumatismo	Compuestos PE-fibras de carbono, PU, silicona
SISTEMA URINARIO	Stent de uretra	Bloqueo de uretra por enfermedad	Silicona, PE
	Esfínter urinario	Incontinencia urinaria	Silicona
	Membranas de hemodiálisis	Fallas de riñón	Nylon, silicona, celulosa, PU, poliacrilonitrilo

LOCALIZACIÓN	DISPOSITIVO	ETIOLOGÍA	MATERIALES
Corazón y sistema vascular	Marcapasos cardíaco	Arritmia, bloqueo cardíaco	Epoxi, Sil, PTFE, A. Inoxidable, Ti
	Prótesis arteriales	Arteriosclerosis, aneurismas	Tejido de poliéster o PTFE
	Oxigenadores sanguíneos	Cirugía a corazón abierto	Policarbonato (PC), cauchos de silicona, poliacetales
Sistema Digestivo	Segmentos gastrointestinales	Traumatismo o enfermedad	Silicona, PVC, nylon, poliacrilatos
	Segmentos de esófago	Traumatismo o enfermedad	PP, PVC

Como Biomateriales de uso masivo y cotidiano en los centros de salud:

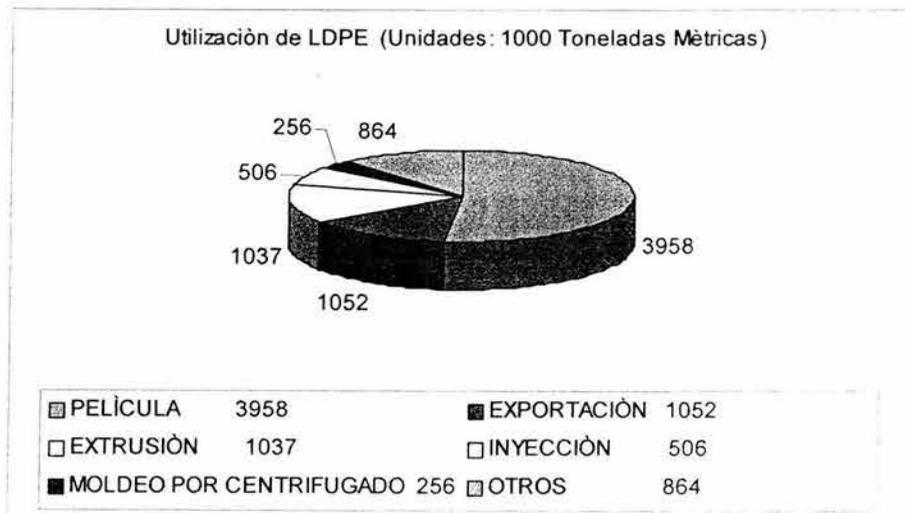
Elemento, componente o producto	Materiales
Catéteres y tabuladoras	PVC, PE, PU, silicona, poliéster, fluoropolímeros (teflón).
Bolsas sanguíneas	PVC
Contenedores quirúrgicos	PE, PVC, poliéster, acrílico
Recipientes y botellas	PE, PVC, PS, PP, poliéster
Partes de analizadores de laboratorio, aspiradores, instrumentos ópticos, etc.	PE, PVC, nylon, etc.
Componente de máquinas para corazón y pulmón.	Polivinilpirrolidona
Partes de dispositivos ópticos y acústicos.	Acrílico, policarbonato, epoxi, etc.
Partes y ruedas de sistemas de transporte	Poliéster, PP, etc.
Equipamiento para transporte de alimentos	PS, PE, PVC, etc.
Jeringas, agujas, tubos de drenaje, bolsas de aire, cubre zapatos, termómetros de uso único, bandas de identificación, tarjetas, paños térmicos y húmedos, recipientes para residuos, etc.	PE, PVC, PU, PS. etc.
Coberturas de sistemas eléctricos, aisladores, etc.	Poliéster, PVC, PC, acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) etc.
Equipamiento y mobiliario	Poliéster, PE, PP, PVC, PS, acrílicos, etc.

Es importante mencionar que los ocho plásticos más vendidos dentro de todos estos rubros industriales estimados hasta el año 2000 en los Estados Unidos, fueron los siguientes [2]:

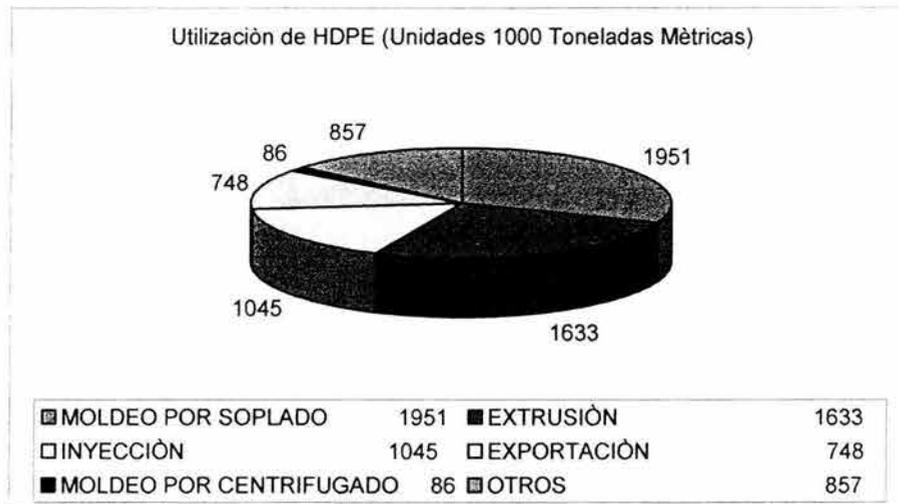
Tabla 1.2 Los ocho plásticos mas vendidos

Nombre del plástico
Polietileno de baja densidad (LDPE)
Polietileno de alta densidad (HDPE)
Policloruro de vinilo (PVC)
Polipropileno (PP)
Poliestireno (PS)
Poliuretano (PU)
Tereftalato de polietileno (PET)
Fenólicos

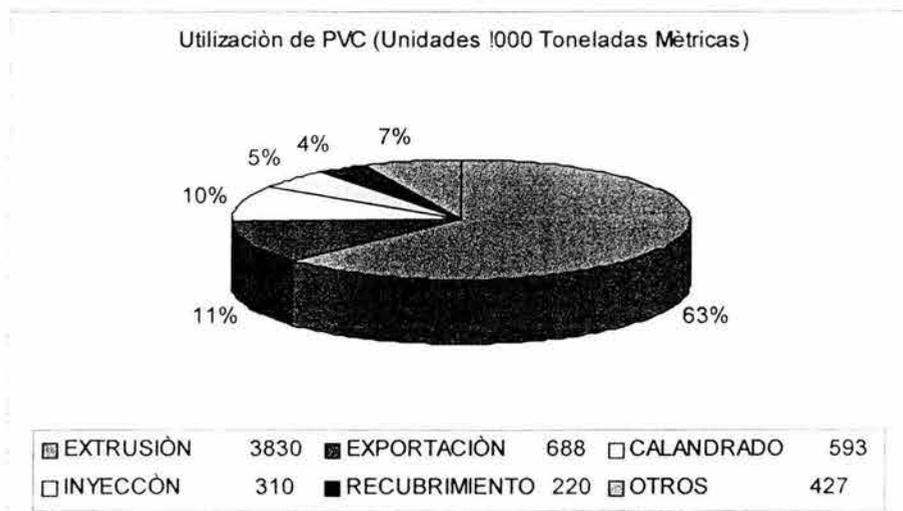
Gráficas de utilización de los ocho plásticos mas vendidos en los Estados Unidos estimados hasta el año 2000.



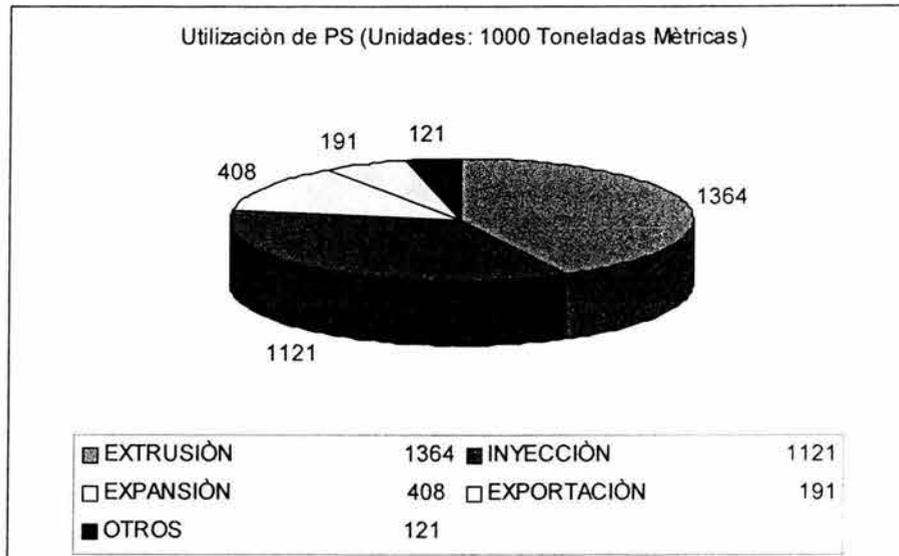
Gráfica 1.1 Utilización de LDPE



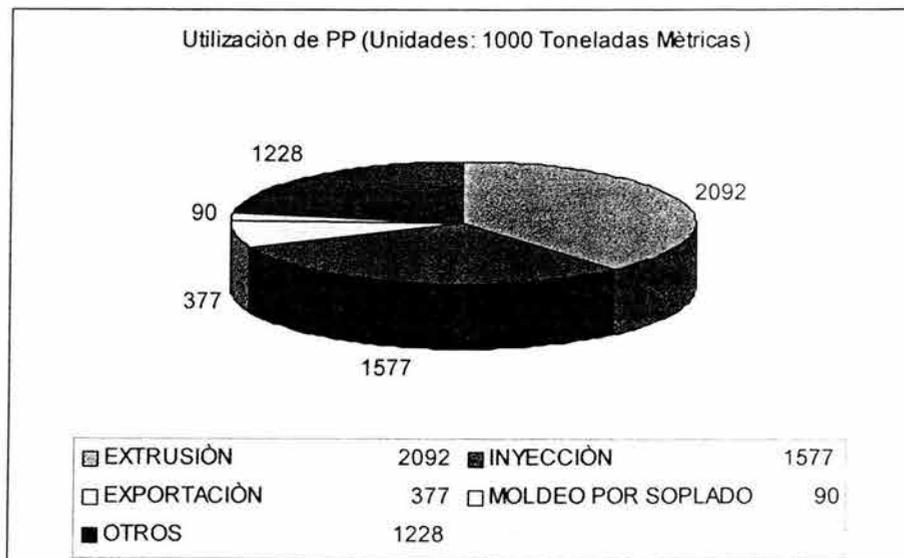
Gráfica 1.2 Utilización de HDPE



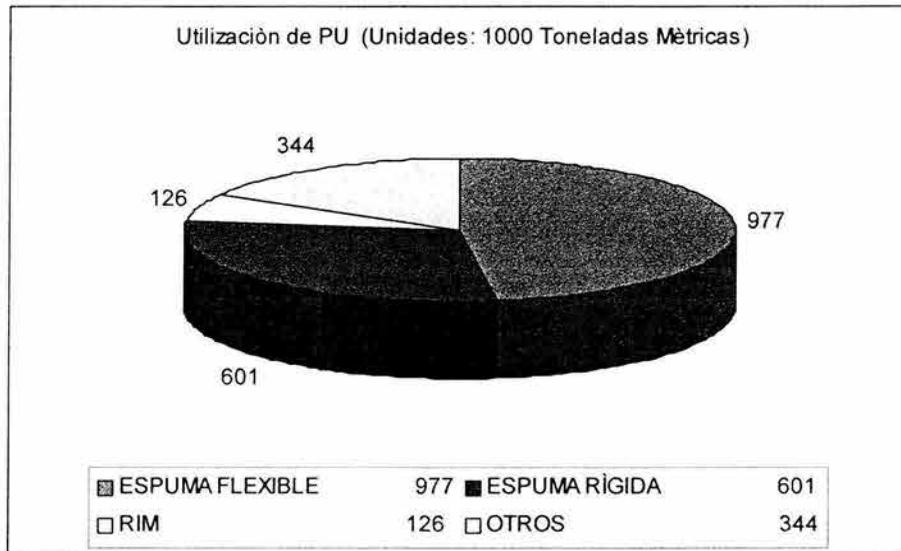
Gráfica 1.3 Utilización de PVC



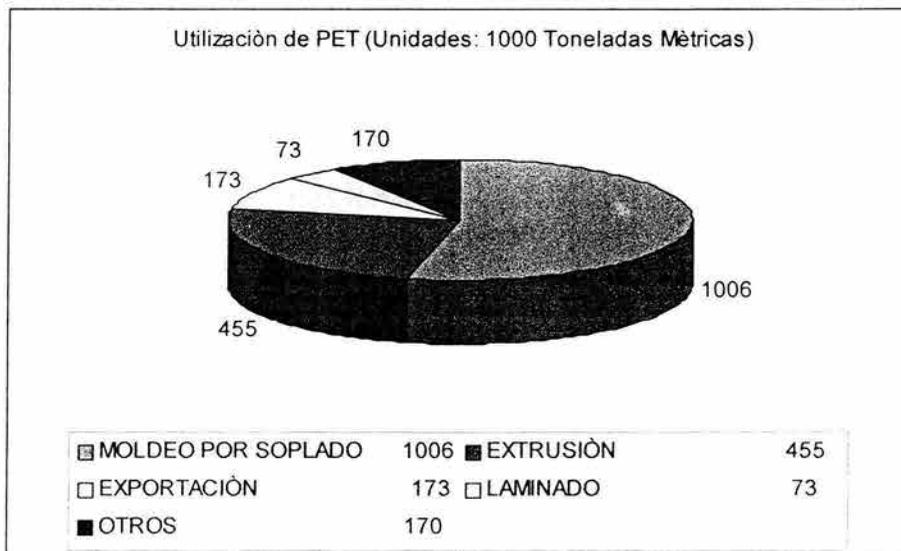
Gráfica 1.4 Utilización de PS



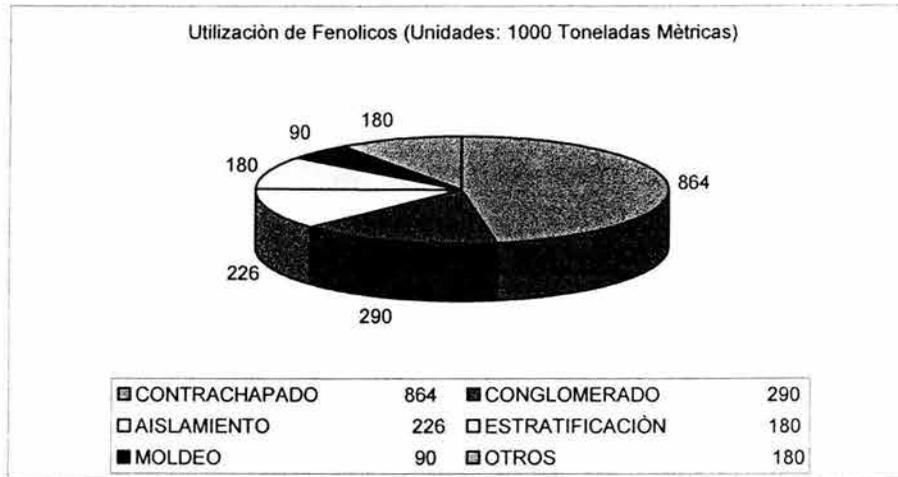
Gráfica 1.5 Utilización de PP



Gráfica 1.6 Utilización de PU



Gráfica 1.7 Utilización de PET

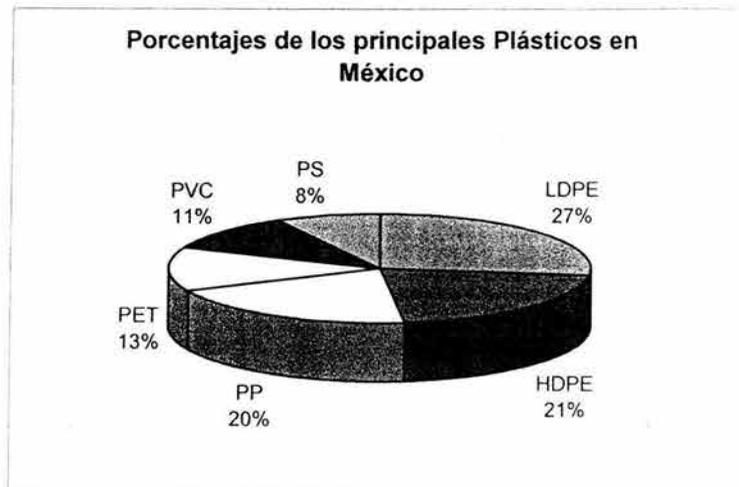


Gráfica 1.8 Utilización de Fenólicos

Consumo de Plásticos en México durante el año 2000.

La industria de los termoplásticos en México tiene una participación importante en la industria del envase y el embalaje, a continuación se muestran los datos del consumo de plásticos hasta el año 2000 [I]:

Poliétileno de baja densidad	LDPE	870
Poliétileno de alta densidad	HDPE	658
Tereftalato de polietileno	PET	413
Polipropileno	PP	643
Poliestireno	PS	265
Policloruro de vinilo	PVC	355
	Total	3,204

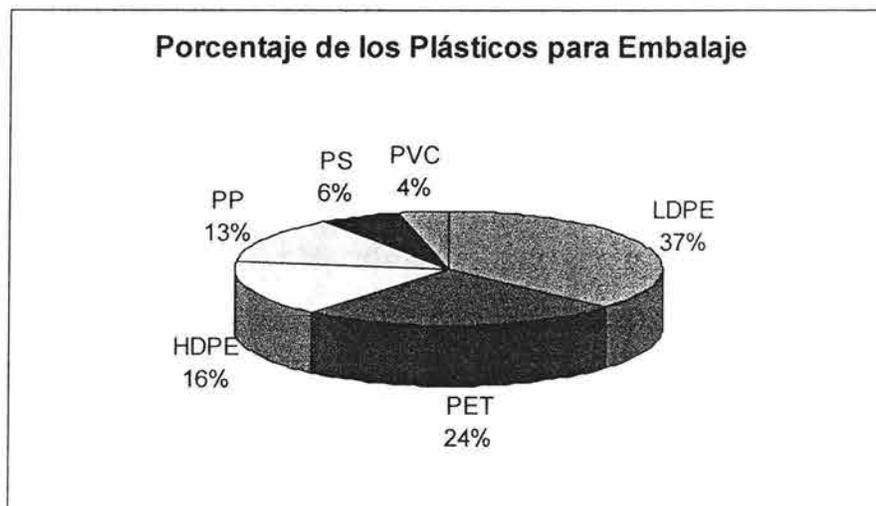


Gráfica 1.9 Principales plásticos en México

APREPET menciona además que el 52.48% de estos materiales plásticos fueron destinados a la fabricación de embalaje, lo anterior se muestra en la siguiente tabla:

Consumo de los principales Plásticos en México para la fabricación de embalaje durante el año 2000.

Poliétileno de baja densidad	LDPE	609
Poliétileno de alta densidad	HDPE	269.8
Tereftalato de polietileno	PET	408.9
Polipropileno	PP	225.1
Poliestireno	PS	108.7
Policloruro de vinilo	PVC	60.4
	TOTAL	1,681.7



Gráfica 1.10 Plásticos para Embalaje

Según datos proporcionados por la Asociación Mexicana de Envases y Embalajes, por la Cámara Nacional de Fabricantes de Envases Metálicos, la Cámara Nacional de la Industria de la Celulosa y el Papel, así como por Bancomext, SECOFI e INEGI durante 1998, la participación aproximada de la industria del plástico para la producción de envases a nivel nacional fue de 844 mil toneladas.

Por otro lado hasta 1996, según datos del PNUMA, el 4% de la producción de petróleo bruto se destinaba a la fabricación de plástico, además realizó una estimación en donde se identificó que se requiere de 18.7 toneladas de petróleo para fabricar 3.74 toneladas de plástico.

1.7 PROPIEDADES DE ALGUNOS PLÁSTICOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA.

Propiedades	Acetato de celulosa (CA)	Poliestireno (PS)	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Polipropileno (PP)
Ventajas	Tenaz, transparente y de bajo costo	Fácil de moldear o extruir, transparente, duro y de bajo costo	Buena resistencia química, tenaz, más rígido que el de baja densidad, fácil de moldear y extruir	Resistente a los agentes químicos, alta flexibilidad, buenas propiedades dieléctricas	Bajo peso, rigidez, tenacidad a temperaturas elevadas, buena resistencia química
Desventajas	Baja resistencia al calor, inflamable	Frágil, baja resistencia a disolventes y rayos UV	Difícil de retardarlo a la flama, tarda muchos años en degradarse	Baja resistencia a la tracción y a la intemperie, malas características de impresión	Se vuelve frágil por de bajo de 0°C, mala resistencia a la intemperie
Ejemplos de aplicación con el proceso de inyección	Artículos de moda, juguetes, mangos para herramientas y cubiertos	Objetos domésticos, juguetes, artículos publicitarios, pequeños recipientes	Botellas, juguetes, recipientes de transporte, aparatos médicos	Recipientes domésticos, juguetes, recipientes de embalaje, frascos flexibles	Juguetes, cascos protectores, instrumental medico, aparatos domésticos
Temperatura de uso	60 - 85°C	60 - 75 °C	105°C	85 - 95°C	120 - 130°C
Estabilidad	Bencinas, aceites y grasas	Ácidos, alcoholes y aceites minerales	Ácidos y álcalis, alcohol	Ácidos y álcalis, alcohol	Ácidos débiles, álcalis débil
Inestabilidad	Ácidos, ésteres, cetonas, éteres	Ésteres, cetonas, éteres, bencina	Benzol, bencina, carburantes	Hidrocarburos clorados, benzol, bencina	Ácidos concentrados, hidrocarburos clorados
Densidad a 20°C	1.3 g/cm ³	1.05 g/cm ³	0.94 - 0.96 g/cm ³	0.92- 0.94 g/cm ³	0.91 g/cm ³
Propiedades generales del producto acabado	Elevada tenacidad, apropiado para piezas con inserciones metálicas, buen brillo	Gran rigidez y exactitud de medidas, valores dieléctricos favorables, resistencia a la humedad	Alta rigidez, buena dureza superficial, estabilidad a la temperatura y estabilidad de forma	Alta flexibilidad, baja dureza superficial, buena resistencia térmica	Elevada estabilidad térmica, resistencia a la tracción y al choque, rigidez, no absorbe agua

1.8 EL PROCESO DE INYECCIÓN.

Los procesos de moldeo sirven para convertir resinas, polvo, pelets y otras formas de plástico, en productos útiles.

Actualmente, el 32% de todos los plásticos es moldeado por inyección debido a la capacidad de producir en grandes cantidades partes complicadas de un modo preciso.

1.8.1 MOLDEO POR INYECCIÓN.

El moldeo por inyección fue una de las herramientas de fabricación para la industria plástica más importante desde que se patentó el tornillo oscilante en 1956 y constituye uno de los principales procedimientos para convertir plásticos en productos útiles. Es casi imposible realizar algo sin la utilización de partes moldeadas por inyección, debido a su utilización en piezas para el interior de automóviles, bastidores electrónicos, artículos para el hogar, equipamiento médico, discos compactos, aparatos de televisión, etc.

El proceso de moldeo por inyección requiere de la fundición del plástico en una extrusora y de la utilización del tornillo de la extrusora para inyectar el plástico en un molde, donde es enfriado. La *velocidad* y la *consistencia* son factores fundamentales para llevar a cabo una exitosa operación de moldeo por inyección, dado que los márgenes de aprovechamiento están generalmente por debajo del 10%.

La velocidad.

Un moldeador maximizará la producción, minimizando la duración del ciclo, que es el tiempo que se necesita para derretir el plástico, inyectarlo en el molde, enfriarlo y obtener una pieza terminada. Mediante la utilización de moldes más grandes que producen más de una pieza por vez, la máquina desarrolla un ciclo que también puede incrementar la producción. A estos moldes se los conoce con el nombre de moldes de cavidades múltiples.

La consistencia.

La consistencia, o la eliminación de desechos y el ahorro de tiempo, son tan importantes como la producción en una operación exitosa de moldeo. Un número de variables entra en juego en el proceso de moldeo por inyección, pero el procesamiento más consistente ocurre cuando se comprende y se controlan la temperatura del plástico, la presión del plástico cuando llena el molde, la velocidad en que el plástico llena el molde y las condiciones de enfriamiento. Estas cuatro variables primarias de moldeo no son independientes, pero generalmente se pueden emplear para comprender los cambios del proceso y solucionar los problemas. Las cuatro variables son aplicables para casi todos los procesos de moldeo por inyección, pero el proceso será medianamente diferente en cada caso, dependiendo en la aplicación, el plástico utilizado y las preferencias del moldeador.

El moldeo por inyección es apropiado para todos los termoplásticos con la excepción de los fluoro-plásticos de politetrafluoroetileno, las poliamidas, algunos poliésteres aromáticos y ciertos tipos especiales. Las máquinas de moldeo por inyección para termoestables sirven para tratar fenólicos, melamina, epoxi, silicona, poliéster y numerosos elastómeros. En todos los casos, los materiales peletizados o granulados absorben suficiente calor para facilitar su fluidez, lo que permite la inyección del plástico caliente en un molde cerrado, en que se crea la forma deseada. Cuando se enfría, o una vez que ha tenido lugar una transformación química, se extraen las piezas del molde con un sistema de expulsión.

Si bien existen diversos tipos de máquinas de moldeo, la de tipo de tornillo oscilante es la más utilizada. En las máquinas de tornillo oscilante, el calor del tambor y el rozamiento creado por las vueltas de la tuerca funden el material granulado. Además de calentar, el tornillo reúne los pelets y actúa a modo de émbolo. Una vez que el material es líquido y uniforme, el tornillo avanza y arrastra el plástico fundido por el sistema de canales hasta las cavidades del molde.

La máquina de moldeo por inyección contiene dos componentes principales: *Las unidades de inyección y la de sujeción.*

Unidad de inyección:

La unidad de inyección se encarga de fundir e inyectar los materiales. Consta principalmente de tambor, cofia del tambor, tobera, tornillo y válvula de retención, bandas de calor, motor para accionar el tornillo y el cilindro hidráulico para desplazar el tornillo atrás y adelante. Los sistemas de control mantienen las temperaturas en los niveles seleccionados e inician cronometrando la rotación del tornillo y los impulsos de inyección. En la figura 1.1 se muestra un gráfico esquemático de una unidad de inyección.

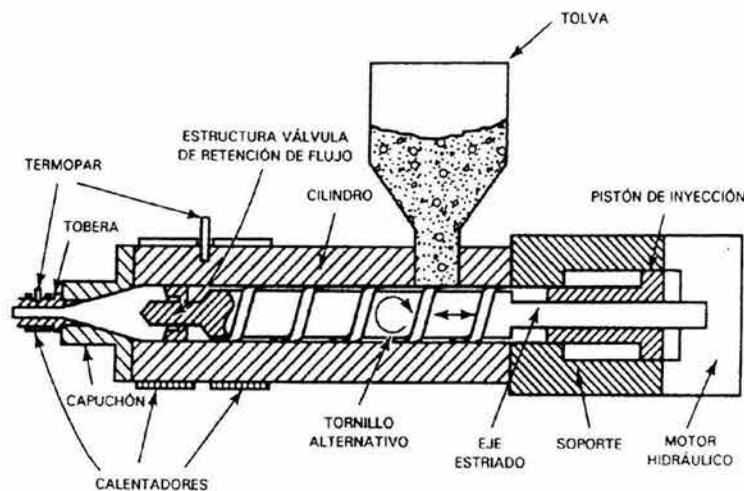


Fig. 1.1 Esquema simplificado de una unidad de inyección.

La acción del tornillo determina la velocidad y la eficacia de plastificación de los pelets. Un tornillo típico consta fundamentalmente de tres secciones: *alimentación*, *zona de transición* y *zona de dosificación*.

La *zona de alimentación* abarca aproximadamente la mitad de la longitud total. La *zona de transición* constituye cerca de la cuarta parte de toda la longitud; en virtud de la compresión y el rozamiento, donde los pelets se funden prácticamente por completo. En la *zona de dosificación*, se funden los pelets que aún permanezcan sólidos, para producir así un material completamente fundido que pasa a la válvula de retención y queda disponible para la inyección en un molde.

La válvula de retención sirve para impedir que el material retroceda durante la inyección. Si esta válvula no funciona adecuadamente, la presión del plástico fundido puede resultar insuficiente para conseguir que circule hasta la cavidad del molde.

Las válvulas de retención pueden ser de dos clases, tal como se muestra en la figura 1.2. (válvula en anillo y válvula de bola).

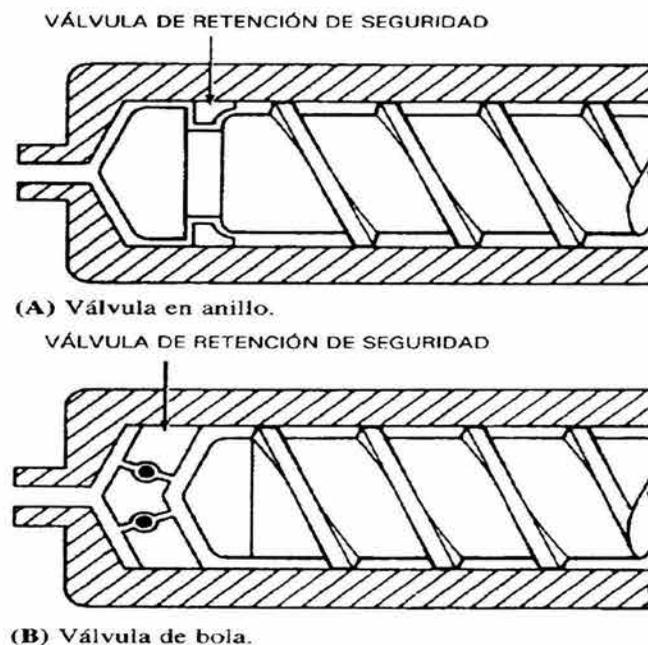


Fig. 1.2 Dos estructuras de válvula de retención, que evitan que retroceda la corriente de plástico fundido durante la inyección.

Unidad de sujeción:

La unidad de sujeción sirve para abrir y cerrar el molde y expulsar las piezas. Los dos métodos más corrientes para generar fuerzas de sujeción usan modelos de abrazaderas hidráulicas directas y basculantes que actúan mediante cilindros hidráulicos.

En la figura (1.3) se ilustran las del tipo basculante en posición cerrada y abierta. En la figura (1.4) se representa también una abrazadera hidráulica. Ambos tipos pueden representar diversos tamaños. Las abrazaderas basculantes generan fuerza mecánicamente, por lo que requiere cilindros de sujeción menores.

Las hidráulicas eliminan las uniones mecánicas, pero requieren un cilindro de sujeción de dimensiones muy superiores. Se pueden utilizar máquinas muy grandes en combinación con mecanismos de sujeción hidráulicos y mecánicos, como se muestra en la figura (1.5).

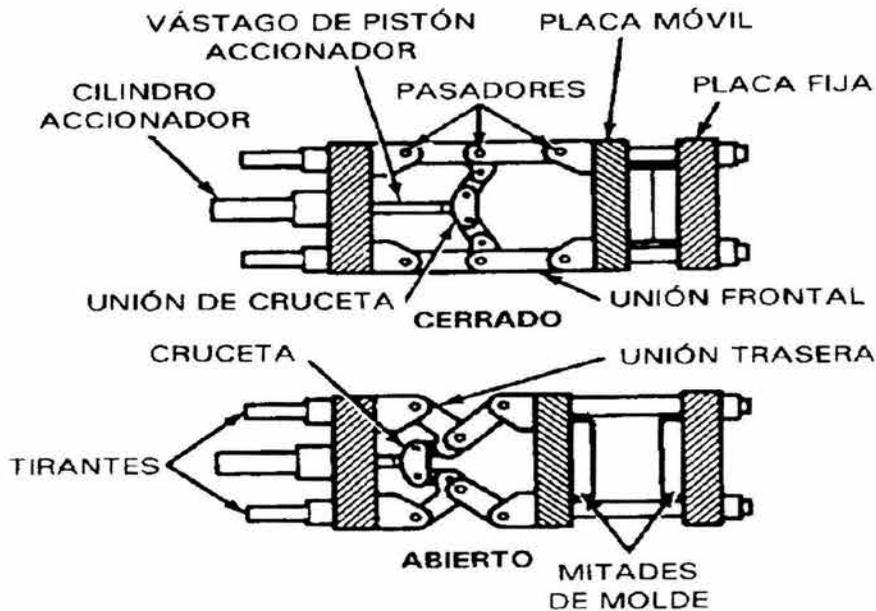


Fig.1.3 Esquema de una abrazadera basculante en las posiciones abierta y cerrada.

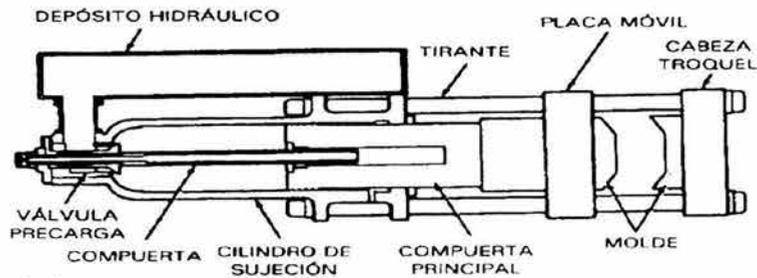


Fig. 1.4 . Abrazadera recta de tipo hidráulico para molde (*Plastics Encyclopedia*).

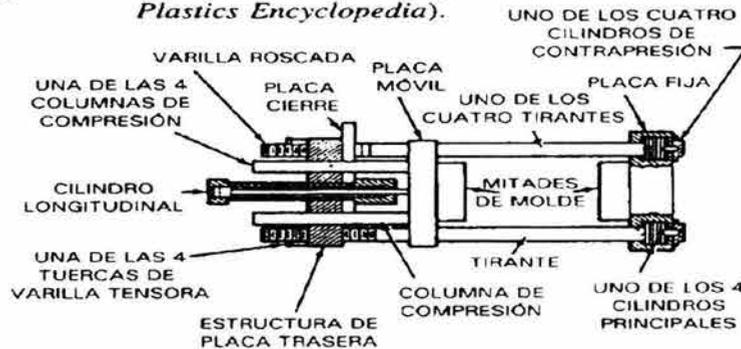


Fig. 1.5 Las abrazadera hidromecánicas se utiliza sobre todo en máquinas grandes.

Una máquina de moldeo por inyección típica incluye una bomba hidráulica para desplazar y presurizar aceite hidráulico, y un depósito de aceite. Las guardas cubren el tambor caliente y evitan el contacto con bandas calefactoras y terminales eléctricos. La puerta frontal permite a los operarios sacar las piezas, aplicar insertos y mantener los moldes limpios. Los pasos más peligrosos de un ciclo de moldeo, el cerrado del molde y la inyección de plásticos calientes, tienen lugar únicamente cuando las guardas se encuentran en su sitio y con las puertas de seguridad cerrada. Existen sistemas que bloquean la operación si no están cerradas las puertas y las guardas.

1.8.2 ELEMENTOS DE LOS CICLOS DE MOLDEO:

El moldeo por inyección consta de cinco etapas fundamentales.

1. Se cierra el molde.

2. A medida que avanza el tornillo, la válvula de retención de la parte frontal del tornillo impide que el material plastificado retroceda por el recorrido del tornillo, de manera que éste actúa como émbolo que empuja el material caliente hacia la cavidad del molde.

3. El tornillo mantiene la presión a través de la tobera hasta que se enfría el plástico. En el moldeo de termoplásticos, los cronómetros mantienen la presión en el plástico hasta que se enfría el material que sale del orificio de inyección. La refrigeración del material formado sirve para separar eficazmente las piezas moldeadas por presión de inyección. Mantener más presión en los plásticos es una pérdida de tiempo.

4. Los cronómetros detienen la presión de inyección y gira el tornillo para recoger material nuevo de la tolva. El tornillo retrocede hasta que se activa una señal que indica que se ha completado la carga de inyección. Un impulso de descompresión hace que retroceda un poco el tornillo. La descompresión favorece el rebose del plástico fundido en el canal de colada.

5. Se abre el molde y se extrae la pieza moldeada con unas espigas de expulsión.

Todos los sistemas de inyección incluyen los cuatro elementos que se enumeran a continuación en un ciclo de tiempos:

1. **Tiempo de carga**, o período necesario para que se desplace el aire de la cavidad del molde con material plástico.

2. **Tiempo de relleno**, definido como el período que se debe mantener suficiente presión para rellenar una pieza y que se solidifique el material que sale del orificio de inyección.

3. **Tiempo de enfriado y secado**, el necesario para que se enfríe y asiente suficientemente para extraerlo de la cavidad del molde de forma segura.

4. **Tiempo muerto**, necesario para abrir el molde, extraer la pieza moldeada y cerrar de nuevo.

1.8.3 VENTAJAS DEL MOLDEO POR INYECCIÓN.

El moldeo por inyección está muy extendido, ya que permite insertos de metal, altos índices de productividad y control de acabado superficial con la textura deseada y una buena precisión en las dimensiones. Para la mayoría de los termoplásticos se puede triturar y volver a utilizar el material sobrante. A continuación, se mencionan algunas ventajas de esta técnica:

- Altos índices de productividad.
- Posibilidad de aplicar cargas e insertos.
- Moldeo de piezas pequeñas y complejas con márgenes de dimensiones ajustados.
- Las piezas no requieren prácticamente acabado.
- Posibilidad de moler y volver a utilizar los desechos termoplásticos.
- Alto índice de automatización del proceso.

1.8.4 INCONVENIENTES DEL MOLDEO POR INYECCIÓN.

- El moldeo por inyección no resulta práctico para series de producción pequeñas.
- Las máquinas de moldeo son caras y el coste de una hora de funcionamiento es bastante alto.
- Por pequeños que sean los moldes de inyección, generalmente suponen una inversión cuantiosa.
- Para elevar la rentabilidad, el número de piezas deberá ser elevado.

- El moldeo es un proceso muy extendido, muchas empresas compiten por los contratos y algunas compañías no pueden mantener los beneficios y entran en quiebra.

El proceso de moldeo por inyección es complicado. Un diseño defectuoso de la pieza o del molde puede traducirse en resultados poco aceptables.

Algunas de las piezas que se pueden formar por el proceso de inyección son los siguientes:

- Bandejas.
- Cajas.
- Botes.
- Vasos.
- Cubetas.
- Grandes cajas o cajones.
- Cajones planos.
- Cierres de diversos tipos.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los problemas asociados con el moldeo por inyección.

Tabla 1.3 Problemas asociados con el moldeo de inyección.

<i>DIFICULTAD</i>	<i>CAUSA</i>	<i>POSIBLE REMEDIO</i>
Manchas, pintas o vetas negras.	<ul style="list-style-type: none"> - Exfoliación de plástico quemado en paredes del cilindro. - Aire atrapado en molde causa quemaduras. - Quemaduras por rozamiento de gránulos fríos contra paredes del cilindro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Purgar cilindro calefactor. - Ventilar molde correctamente. - Usar plásticos lubricados.
Burbujas.	<ul style="list-style-type: none"> - Humedad en gránulos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Secar el granulo antes del moldeo.
Rebabas.	<ul style="list-style-type: none"> - Material demasiado caliente. - Presión demasiada alta. - Línea de separación insuficiente. - Presión de sujeción insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir temperatura. - Reducir presión. - Rectificar la línea de separación. - Aumentar la presión de sujeción.
Pieza moldeada de escasas dimensiones.	<ul style="list-style-type: none"> - Material frío. - Molde frío. - Presión insuficiente. - Orificio de colada pequeño. - Aire atrapado. - Falta de equilibrio en el flujo del plástico al molde de varias cavidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevar temperatura. - Elevar temperatura de molde. - Aumentar presión. - Agrandar el orificio de inyección. - Aumentar tamaño de ventilación. - Corregir sistemas de canales.

Tabla 1.3 Continuación.

<i>DIFICULTAD</i>	<i>CAUSA</i>	<i>POSIBLE REMEDIO</i>
Acabado deficiente.	<ul style="list-style-type: none"> - Molde demasiado frío. - Presión de inyección demasiado baja. - Agua en el molde. - Exceso de lubricante en el molde. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevar la temperatura del molde. - Elevar la presión de inyección. - Limpiar el molde. - Pulir el molde.
Depresión superficial.	<ul style="list-style-type: none"> - Insuficiente plástico en el molde. - Plástico demasiado caliente. - Poca presión de inyección. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar la velocidad de inyección y comprobar las dimensiones del orificio de inyección. - Reducir la temperatura del cilindro. - Aumentar la presión de inyección.
Combaduras.	<ul style="list-style-type: none"> - Parte expulsada caliente. - Plástico demasiado frío. - Demasiada corriente de alimentación. - Desequilibrio en orificios de inyección. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir la temperatura del plástico. - Elevar la temperatura del cilindro. - Reducir la alimentación - Cambiar posición y reducir los orificios de inyección
Marcas superficiales.	<ul style="list-style-type: none"> - Material frío. - Inyección lenta. - Desequilibrio en el flujo de canales de inyección y entradas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevar la temperatura del plástico. - Elevar la temperatura del molde. - Aumentar la velocidad de inyección y reequilibrar orificios de inyección o canales.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES SOBRE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES DE INYECCIÓN.

2.1 INTRODUCCIÓN:

En los primeros tiempos de su desarrollo, los plásticos se elegían principalmente como sustitutos de otros materiales. Algunos tuvieron mucho éxito por el nuevo concepto que representaban y la novedad del material; en cambio, otros fracasaron, debido a que los diseñadores no conocían de modo suficiente las propiedades de los plásticos. Paralelamente al crecimiento de la industria del plástico, los diseñadores han recogido cada vez más datos sobre las propiedades de los materiales.

Al combinar una serie de propiedades que no reúne ningún otro material, como resistencia, ligereza, flexibilidad y transparencia, en la actualidad el plástico es el material por excelencia utilizado en la industria.

En la década de los 80's tres nuevos recursos computacionales revolucionaron el diseño en el mundo de la industria: el Diseño Asistido por Computadora (CAD), la fabricación asistida por computadora (CAM) y la ingeniería asistida por computadora (CAE). En estas técnicas se eliminan prácticamente las tareas de dibujo y cálculo, gracias a lo cual diseñadores, fabricantes de materiales y de herramientas cometen menos errores en el diseño de la pieza.

En la actualidad, el diseñador puede valerse de una computadora para el diseño en ingeniería y la fabricación de cualquier artículo de plástico. La ventaja principal del uso de las computadoras en ingeniería es el perfeccionamiento del diseño, la mejora de productividad de mano de obra, la competencia en el mercado, el rendimiento de capital, la innovación, la calidad y la rentabilidad. Con la ingeniería asistida por computadora (CAE), el diseñador puede emplear elemento finito y otros sistemas de análisis del diseño. El CAM es útil para programación, interfases con robótica, control de calidad, etc. Con los sistemas CAD/CAM/CAE se pueden evaluar y revisar elementos de precio superior como son gestión del material, herramientas y su mantenimiento, costo de materia prima o pérdidas por chatarra, antes de comenzar la producción.

Principalmente, son tres las consideraciones que se toman en cuenta en un diseño. Estas consideraciones son las siguientes:

- A) Consideraciones sobre los materiales.*
- B) Consideraciones de diseño.*
- C) Consideraciones de producción.*

2.2 CONSIDERACIONES SOBRE LOS MATERIALES.

- Se deben seleccionar materiales que posean las propiedades adecuadas para satisfacer las condiciones de diseño, economía y servicio.
- Se debe de ser cauto a la hora de manejar los datos de información.
- Conviene seleccionar cuidadosamente los materiales plásticos, considerando siempre el producto final.
- Las propiedades de los plásticos dependen más de la temperatura que en ningún otro material.
- El plástico es más sensible a los cambios del medio ambiente, por lo que muchas familias de plástico pueden tener un uso limitado.
- La selección final del material para fabricar un producto se guía por el objetivo de alcanzar el equilibrio más favorable entre diseño, fabricación y costo total del artículo acabado.

2.2.1 MEDIO AMBIENTE.

Al diseñar un producto de plástico, las condiciones físicas, químicas y térmicas son consideraciones muy importantes. El intervalo de temperatura práctico para la mayoría de los plásticos rara vez excede los 200°C.

Muchas piezas expuestas a energía radiante y a rayos ultravioleta experimentan un rápido deterioro, quedan frágiles y pierden su resistencia mecánica. Para productos que funcionen por encima de los 230°C, se deben emplear por ejemplo fluoro-carbonos, siliconas y poliamidas.

- Ciertos plásticos retienen sus propiedades a temperaturas criogénicas (extremadamente bajas). Los contenedores, cojinetes y tubos flexibles deben funcionar correctamente a temperaturas por debajo de los 0°C. Los entornos fríos y hostiles del espacio y la Tierra son dos ejemplos. Siempre que entre en juego la refrigeración o los envases para alimentos o en los casos en que el olor y el aroma suponen un problema, se deben elegir los plásticos idóneos.

Además de los extremos de temperatura, humedad, radiación, abrasivos y otros factores del ambiente, el diseñador debe considerar la resistencia al fuego.

La humedad puede causar el deterioro y debilitar al refuerzo y la unión con la matriz en los materiales compuestos. Orificios, bordes expuestos o superficies mecanizadas de diseños compuestos deberán ser protegidos con un recubrimiento para evitar la infiltración de la humedad o la absorción capilar.

2.2.2 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS.

Todos los plásticos poseen características útiles como aislantes eléctricos. La selección del plástico suele basarse en las propiedades mecánicas, térmicas y químicas, aunque el sector pionero de esta industria fue el de las aplicaciones eléctricas. Los problemas de aislamiento eléctrico en entornos a gran altitud, en el espacio, en el fondo marino o subterráneos se resuelven mediante el uso de plásticos. El radar resistente a la intemperie y el sonar submarino no serían posibles sin el uso del plástico. Estos materiales también se usan para aislar, revestir y proteger componentes electrónicos.

2.2.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.

La naturaleza química y eléctrica de los plásticos está íntimamente relacionada con su composición molecular. No existe una regla general sobre la resistencia química. Habrá que probar cada plástico en particular en el entorno químico para determinar su uso real. Los fluoro-carbonos, poliéteres clorados y poliolefinas se encuentran entre los materiales con mayor resistencia química. Algunos plásticos reaccionan como membranas semipermeables y permiten el paso de determinadas sustancias químicas y gases al tiempo que bloquean otras. La permeabilidad del polietileno es una ventaja para los envases de frutas y carnes frescas. Las siliconas y otros plásticos permiten el paso de oxígeno y gases a través de una fina membrana pero detienen a la molécula de agua y a muchos iones químicos. La filtración selectiva de minerales del agua se puede lograr con membranas de plástico semipermeables.

2.2.4 FACTORES MECÁNICOS.

La elección del material incluye la consideración de factores mecánicos como son la resistencia a la fatiga, a la tracción, a la flexión, al impacto, a la contracción, dureza, amortiguamiento, estabilidad dimensional, etc.

Los productos que requieren estabilidad dimensional exigen una atenta selección de los materiales, si bien las cargas sirven para mejorarla. Un factor que a veces se tiene en cuenta para la evaluación y la selección es la relación de resistencia-masa, la relación entre resistencia a la tracción y densidad de un material. Los plásticos pueden superar al acero en relación de resistencia-masa.

El tipo y orientación de los refuerzos influye en gran medida en las propiedades de los productos compuestos. Existe un factor de seguridad (a veces también denominado factor de diseño), que se define como la relación entre la resistencia definitiva de un material y el esfuerzo de trabajo tolerable. El factor de seguridad para un engrane de aterrizaje para avión de material compuesto podría ser 10, mientras que para un muelle de automóvil sería solamente 3. Con datos precisos y fiables, algunos diseñadores utilizan factores de seguridad de 1.5 a 2.

2.2.5 ECONOMÍA.

La última fase en la selección de un material viene dada por el aspecto económico. No es aconsejable considerar el costo del material en la selección preliminar de los materiales candidatos. En este punto no se deben desechar los materiales con propiedades de comportamiento marginales o por su costo, ya que tal vez constituyan un candidato adecuado según los parámetros de tratamiento, ensamblaje acabado y condiciones de operación.

El costo es siempre un factor principal en las consideraciones del diseño o selección de materiales. La relación resistencia-masa, o la resistencia química, eléctrica y a la humedad, puede superar el inconveniente del precio. Algunos plásticos tienen un mayor costo por kilogramo que los metales y otros materiales, pero generalmente son más baratos por pieza acabada. La comparación más significativa entre diferentes plásticos es el costo por centímetro cúbico.

Los tres factores que se compensan en el diseño de un plástico son el servicio, la producción y el costo. El uso y comportamiento de un artículo crea interés cuando se definen algunos factores de diseño. Para cada diseño en concreto, pueden existir varias opciones de producción o proceso. Los costos generalmente compensan los demás elementos que se tienen en cuenta para el diseño y el desarrollo, en general se basan en el método de producción.

El volumen de ventas es importante. Si el molde cuesta por ejemplo 10,000 dólares y se van a fabricar únicamente 10,000 piezas, el molde costaría para cada una 1 dólar. En cambio, si el número asciende a 1000,000 el molde costaría 0,01 dólares por pieza.

2.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

Al considerar las condiciones de diseño global deben revisarse la aplicación o función pretendida, el entorno, los requisitos de calidad y las especificaciones.

2.3.1 ASPECTO.

Tal vez el consumidor sea el que mejor conozca el aspecto físico y la utilidad de un artículo, que abarca el diseño, el color, las propiedades ópticas y el acabado superficial. Los elementos de diseño y el aspecto agrupan varias propiedades a la vez. El color, la textura, la forma y el material pueden hacer que un producto sea atractivo para el consumidor o no.

Para asegurar un diseño correcto debe existir una colaboración entre los encargados de la obtención del molde, los fabricantes y los encargados del tratamiento. Antes de moldear la pieza, es necesario meditar sobre su diseño para garantizar que se consiga la mejor combinación de propiedades mecánicas, eléctricas, químicas.

Al forzar un material para que se adapte a la forma del molde, se crean tensiones residuales, que se bloquean durante el enfriamiento o curado y la contracción de la matriz, pero puede ocasionar el alabeo de superficies planas.

En el moldeo, es importante rellenar cómodamente todas las superficies de la cavidad del molde para reducir al mínimo de forma uniforme la mayoría de las tensiones en el moldeo de la pieza. Conviene conseguir un espesor de pared uniforme en el diseño para prevenir una contracción irregular de secciones delgadas y gruesas. Si el grosor de la pared no es uniforme, la pieza acabada se puede deformar, alabeo o presentar tensiones internas o grietas.

La decoración puede ser un factor importante en el diseño del plástico. El producto puede incluir texturas, instrucciones, letreros y debe estar decorado de manera que no se complique la extracción del molde.

2.3.2 LIMITACIONES DE DISEÑO.

La velocidad de producción, las líneas de división, las tolerancias de dimensiones, las muescas, el acabado y la contracción del material son puntos que deberá tener en cuenta el fabricante de moldes.

Así mismo, debe considerarse la contracción térmica para la mayoría de los plásticos que es relativamente alta, lo que supone una ventaja en la extracción de los productos moldeados de la cavidad del molde. Si se requieren tolerancias estrechas, será necesario considerar la contracción del material y la estabilidad dimensional.

El uso de un sistema CAD permite señalar la respuesta al esfuerzo de una pieza y la orientación de flujo. Una vez realizado el diseño preliminar, generalmente se obtiene un prototipo físico, con el que el ingeniero de diseño y otros expertos comprueban su funcionamiento.

2.4 CONSIDERACIONES DE PRODUCCIÓN.

En cualquier diseño de producto, el comportamiento del material y el costo se suelen reflejar en las técnicas de moldeo, la fabricación y ensamblaje. El diseño de la herramienta debe tener en cuenta la contracción de material, la tolerancia dimensional, el diseño del molde, los insertos, la decoración, la velocidad de producción etc.

2.4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN

Con la tecnología y los materiales nuevos, el tratamiento constituye normalmente un factor competitivo decisivo. En la actualidad, es posible moldear por extrusión o extruir muchos termoestables. Tanto los termoplásticos como los termoestables se pueden hacer celulares. Gracias a la capacidad de moldeo, los índices de producción y otras propiedades, materiales aparentemente costosos, se abaratan notablemente.

2.4.2 CONTRACCIÓN DE MATERIAL.

Las irregularidades en el grosor de pared pueden crear tensiones internas en la pieza moldeada. Las zonas gruesas tardan más en enfriarse que las delgadas y pueden causar rechupados, así como contracción diferencial en los plásticos cristalinos moldeados por inyección que tienen una alta contracción.

Se debe ejercer una gran presión para introducir el material por las zonas más estrechas, por lo que se origina el problema de la contracción del material. Los polietilenos, los polipropilenos y algunos polivinilos se contraen de 0.5 mm a 0.76 mm después del moldeo.

Normalmente, los plásticos moldeados por inyección sin carga se contraen más en la dirección del flujo que en el sentido transversal. Esto se debe principalmente al moldeo de orientación creado por la dirección del flujo desde las entradas. La contracción diferencial se produce porque los plásticos orientados tienen normalmente una mayor contracción que los no orientados.

2.4.3 TOLERANCIAS.

El moldeo de artículos con tolerancias de precisión exige una selección cuidadosa de materiales. Las tolerancias dimensionales de artículos moldeados de cavidad única se puede mantener en $\pm 0,05$ mm/mm o menos con plásticos determinados. Los errores en las herramientas, las variaciones de contracción entre piezas de varias cavidades y las diferencias de temperatura, carga y presión de una cavidad a otra son circunstancias que aumentan las tolerancias dimensionales críticas de moldes de varias cavidades.

Existen tres clases de tolerancias dimensionales para moldear piezas de plástico. La tolerancia *fin*a es el límite más ajustado posible de la posible variación en producción controlada. La tolerancia *patrón* es el control de dimensiones que se puede mantener en condiciones medias de fabricación. La tolerancia *aproximada* es aceptable en piezas en las que no son importantes las dimensiones exactas.

2.5 MOLDES DE INYECCIÓN.

2.5.1 INTRODUCCIÓN.

La gran variedad de materiales y de métodos de moldeo existentes ha hecho preciso el desarrollo de muchos tipos de moldes para poder aprovechar al máximo las posibilidades de los diferentes materiales. Se utilizan tres tipos fundamentales de moldes los cuales son los siguientes: moldes de compresión, de transferencia y de inyección.

Los *moldes de inyección* son semejantes a los de transferencia, con la diferencia de que los primeros no llevan cámara de carga. El compuesto se plastifica en la máquina de inyección y luego es obligado a pasar a través del bebedero y los canales del molde, para finalmente entrar en las cavidades del molde. La presión de cierre de la máquina de inyección mantiene cerrado el molde mientras se inyecta el material sometido a una presión.

Los moldes de inyección son una herramienta muy importante dentro de la industria del plástico. Por esta razón, en el proceso de inyección es indispensable una adaptación entre el molde y la máquina de inyección para lograr resultados favorables.

Por otro lado, se deben tener en cuenta diversos factores para la elaboración correcta del molde como son los siguientes:

Los esfuerzos a soportar por los moldes, y la elección del material para fabricarlo.

Otro aspecto importante es la duración de los moldes que está influenciada principalmente por el esfuerzo mecánico debido a las fuerzas de cierre relativamente altas, junto a las presiones internas durante la inyección. Existe también un desgaste por rozamiento por lo cual se tiene que lubricar el molde para reducir al mínimo la abrasión.

2.5.2 CLASIFICACIÓN DE MOLDES

Según la cantidad de cavidades, se tienen moldes simples o múltiples. Para que el llenado, la refrigeración y el desmolde sean uniformes, es conveniente fabricar solamente piezas de la misma especie en un molde múltiple.

2.5.3 MOLDES SENCILLOS O MÚLTIPLES.

La diferencia entre un molde sencillo y uno múltiple es la cantidad de cavidades del molde. Por lo general, el material, la forma de la pieza y la máquina inyectora, son fundamentales para la elaboración del molde, para que se pueda conseguir la calidad deseada de las piezas a inyectar y claro no se debe olvidar la rentabilidad del molde. Aquí es donde entra la cuestión de la cantidad de cavidades del molde y así mismo el costo. Una vez fijadas las características de realización de la pieza y el material, el número de cavidades depende, en primer lugar, de la máquina.

2.5.4 MATERIALES PARA LOS MOLDES DE INYECCIÓN.

En lo que se refiere a la fabricación de moldes de inyección, el acero es el material utilizado, el cual puede definirse como un metal que posee propiedades que hacen de éste un material muy útil para la fabricación.

Hay cuatro clases generales de acero utilizado por los fabricantes de moldes, y son:

1. Acero de bajo contenido en carbono (menos del 0.20%). Este acero no posee suficiente carbono que le permita endurecerlo suficiente cuando se calienta y se templea.
2. Acero de contenido medio en carbono (0.20 a 0.60%).
3. Acero de alto contenido en carbono (0.70 a 1.30%).
4. Aceros aleados. Los aceros de esta clase contienen diversos elementos además de carbono.

El acero se fabrica a partir de hierro, al cual se le añaden otros elementos tales como: carbono, manganeso, cromo, níquel, vanadio, molibdeno y cobalto, sólo o en combinación para obtener las características deseadas.

En los primeros tiempos del moldeo de plásticos, los aceros no estaban considerados como una parte importante del molde. A medida que esta industria fue progresando, numerosos factores hicieron adquirir importancia al acero y comenzaron a realizarse numerosas peticiones a los fabricantes del mismo. Aumentó el tamaño de los moldes, sus formas se hicieron más complejas, se utilizaron presiones más altas y los nuevos desarrollos añadieron nuevos materiales a la lista de compuestos de moldeo, algunos de los cuales eran corrosivos y otros abrasivos.

El acero de muy bajo contenido en carbono se denomina a veces como hierro. La mayor desventaja de los materiales de este tipo es su falta de resistencia física en estado templado. Esta falta de dureza conduce a la deformación y rotura de los asientos cuando se aplican grandes presiones unitarias. Sin embargo son los materiales casi ideales cuando la facilidad de maquinado tiene gran importancia. Estos aceros suelen tener un alto contenido en fósforo y azufre y con frecuencia contienen inclusiones no metálicas que dañarían el acabado del moldeo y de la pieza moldeada.

Por estas razones se mencionan a continuación las exigencias que se deben cumplir para elaborar los moldes.

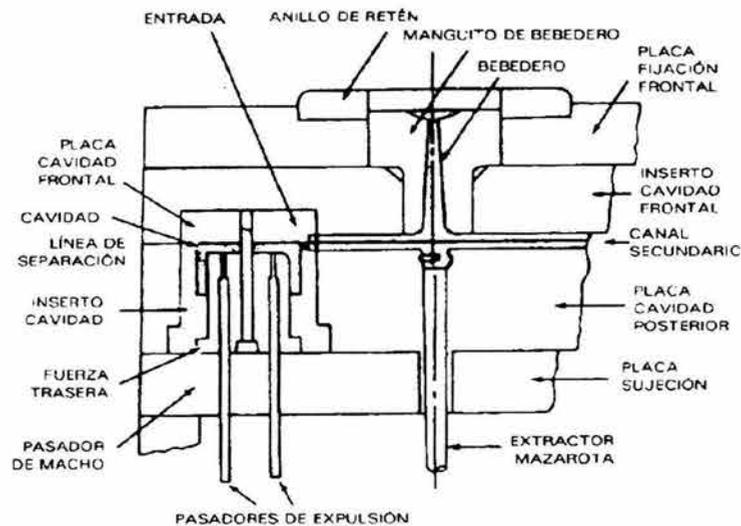
Las exigencias de las industrias respecto al material de un molde pueden resumirse en los siguientes puntos:

- I. Máxima resistencia a la abrasión, para alcanzar la duración máxima.
- II. Gran estabilidad de dimensiones, incluso con influencias térmicas relativamente amplias, en las condiciones de trabajo, para garantizar la exactitud de forma y dimensiones de las piezas.
- III. Gran resistencia a la corrosión en los moldes que hayan de usarse para elaborar termoplásticos con componentes agresivos.

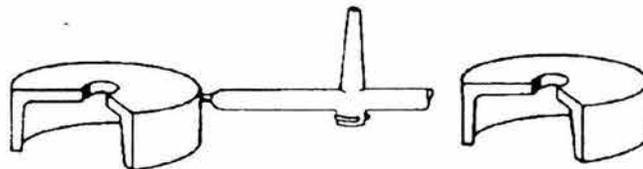
- IV. Buena capacidad de elaboración, principalmente por mecanizado con arranque de viruta.
- V. Gran seguridad para el templado.
- VI. Buena calidad de superficie (Las partes de los elementos en contacto con la masa han de poder pulirse para garantizar una óptima calidad de superficie de las piezas).

2.5.5 ELEMENTOS DEL MOLDE DE INYECCIÓN

El molde de inyección cuenta con las siguientes partes: *Bebederos y los canales secundarios o entradas*, por estos lugares es por donde circula el material fundido y caliente. Fig.(2.1)



(A) Molde



(B) Pieza moldeada, canal secundario, entrada, bebedero y pieza típica

Fig. 2.1 Construcción de un molde de inyección y pieza moldeada

Al canal con forma cónica que conecta a la tobera con los canales secundarios se le denomina *Bebedero* Fig.(2.2). En un molde de cavidad única, el bebedero introduce el material directamente de la entrada a la cavidad del molde.

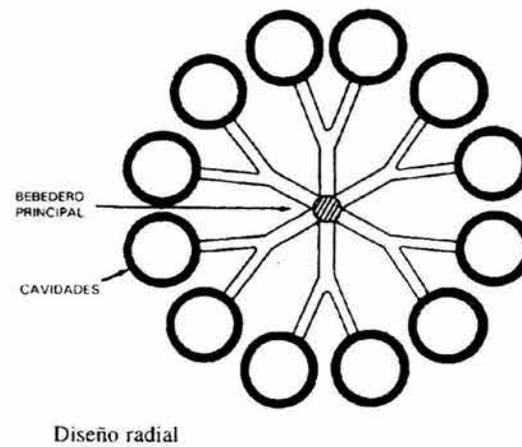
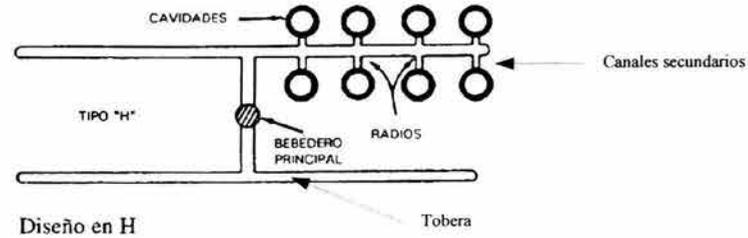


Fig. 2.2 Algunos diseños de canales típicos

Los *canales secundarios*: son conductos estrechos que traspasan el plástico fundido desde el bebedero hasta cada una de las cavidades. En los moldes de varias cavidades, el sistema de canales deberá estar diseñado de manera que el plástico fundido recorra la misma distancia desde el bebedero hasta cada una de las cavidades. Fig.(2.3)

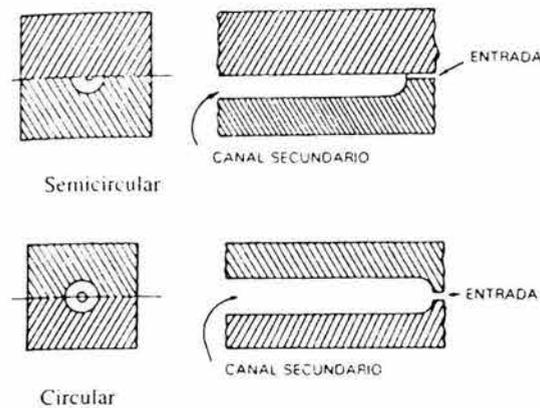


Fig. 2.3 Dos sistemas de canal secundario básico utilizados en el moldeo de inyección.

Los moldes pueden tener una o varias cavidades pero independientemente del número de éstas, la *entrada* es el punto de partida. Las entradas pueden tener cualquier forma o tamaño pero por lo general son pequeñas para que las imperfecciones sean mínimas. Las entradas deben permitir una corriente fluida del material fundido hasta la cavidad. Fig.(2.4)

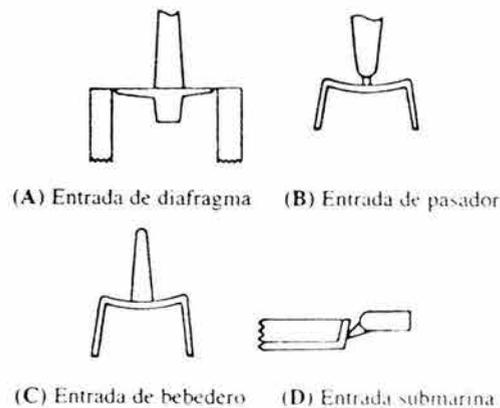


Fig. 2.4 Algunos sistemas de entradas posibles

El canal debe estar terminado con un pulido brillante y tener las estrías de pulido en sentido longitudinal, para evitar imperfecciones. Si se cumplen estas condiciones, al abrir el molde, la mazarota quedará como prolongación respecto al canal del bebedero o bien saldrá junto con la pieza por el lado del molde correspondiente al eyector. La mazarota tiene que salir sin dificultades del bebedero. En las piezas que no se inyectan directamente, si no que es a través de un canal de desvío, el orificio del bebedero se prolonga y se realiza en forma especial para garantizar, el desmolde de la mazarota.

2.5.6 ENFRIAMIENTO DEL MOLDE.

El enfriamiento es de gran importancia para la calidad y rentabilidad que muchas veces se exige que se tenga en cuenta para la construcción de un molde, aunque pocas veces se hace. La construcción se debe hacer siguiendo el llamado principio del cono, es decir, que la pieza se tiene que ir enfriando uniformemente, partiendo del borde exterior hacia el punto de la colada.

Al elegir la temperatura del molde se tendrán en cuenta exigencias económicas y de la técnica de la producción. Por lo general, las temperaturas elevadas producen:

Buenas superficies (brillo)

Buena fluidez.

Reducido grado de orientación y pocas tensiones propias.

Pocas grietas de tensión.

Poca contracción posterior.

Largos tiempos de enfriamiento.

2.5.7 RESPIRACIÓN DEL MOLDE.

En un molde cerrado, es absolutamente imprescindible facilitar el escape de aire y de gases. Si el escape o respiración es deficiente, se corre el peligro de obtener zonas sin llenar y de poca solidez, mala apariencia, extracción difícil y un ciclo poco eficiente. Una zona del molde donde se deben poner respiraderos, es en los canales de alimentación.

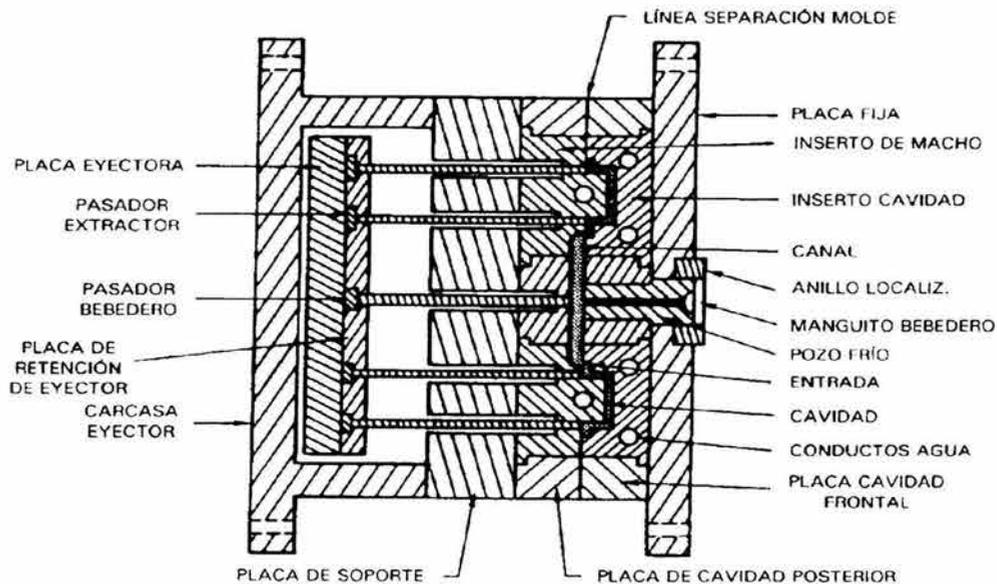
2.5.8 DISEÑO BÁSICO DE MOLDES DE INYECCIÓN.

Los tipos más usados con más frecuencia son los siguientes:

Dos placas. Las cavidades del molde se montan en una placa y los machos en el otro; el bebedero central va situado en la mitad fija del molde, y alimenta directamente al sistema de canales de alimentación en moldes de cavidades múltiples o sirve de entrada directa en el centro en moldes de una sola cavidad. La mitad móvil del molde contiene normalmente los machos y el mecanismo extractor, y en la mayor parte de los casos, los sistemas de alimentación.

Tres placas. La introducción de un tercera placa móvil, que contiene normalmente las cavidades en moldes múltiples, permite situar las entradas centrales o laterales en cada cavidad a partir del sistema de canales de alimentación que parten del bebedero central. Este tipo de diseño se utiliza mucho y, en muchos casos, es preciso utilizar extractores de mazarota múltiples para lograr una operación eficiente.

Esquema de un molde de inyección de dos placas:



2.5.9 PROBLEMAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR DURANTE LA ELABORACIÓN DE LOS MOLDES.

A continuación se enumeran algunos defectos de elaboración producidos por una mala construcción del molde y las medidas a tomar para eliminarlos, considerando que la masa de moldeo está preparada de forma óptima por la unidad de plastificación de la máquina y del ajustamiento óptimo de los factores que influyen en el funcionamiento de la misma, como la presión residual, velocidad de inyección, fuerza de cierre, etc.

1.- La masa escapa por un lado de la boquilla.

- Los agujeros de la boquilla y del bebedero no están alineados; revisar el centrado.
- La boquilla no ejerce suficiente presión sobre el bebedero; el agujero de la boquilla es mayor que el del bebedero.

2.- Las mazarotas se rompen y no pueden desmoldearse.

Hay resaltes en el cono de entrada porque:

- a) Los radios de las superficies de contacto de boquilla y bebedero no son correctos.
- b) La boquilla y el bebedero no están alineados.
- c) El agujero de la boquilla es mayor que el del bebedero.
- d) El agujero del bebedero tiene estrías de pulido en sentido transversal.

3.- La pieza no puede desmoldearse.

a) La pieza queda adherida a la matriz.

- El bebedero o el sistema de llenado tiene resaltes.
- Temperatura de la matriz muy baja.
- Eventualmente formación de vacío.
- Controlar la conicidad.

b) La pieza se rompe al desmoldear.

- Los resaltes de la pieza son excesivos.
- Posición de los expulsores en un punto desfavorable para transmitir la fuerza.
- Varillas expulsoras muy pequeñas, que producen excesivas fuerzas de presión.
- Controlar el pulido de las paredes de la cavidad.
- Eventualmente formación de vacío.
- Controlar la conicidad.

4.- El molde se llena parcialmente.

- Canales distribuidores muy largos y estrechos; ampliarse el sistema de llenado.
- Caminos de flujo muy largos y estrechos; ajustar los canales de estrangulamiento.
- Mala salida de aire.

5.- Llenado excesivo; formación de rebabas.

- Mal ajuste del plano de partición.
- La fuerza de cierre no es suficiente.

6.- Quemaduras en la pieza.

- Masa demasiado caliente debido a canales de entrada muy estrechos.
- Escasa salida de aire (efecto Diesel).

7.- Las piezas se deforman.

- Temperatura irregular del molde.
- Temperatura del molde incorrecta.

8.- Rechupes en la pieza.

- Sistema de llenado muy pequeño.
- El sistema solidifica antes de actuar la presión residual.
- Temperatura del molde muy baja.

CAPITULO 3

FUNDAMENTOS DEL ROCIADO TÉRMICO.

3.1 INTRODUCCIÓN:

La tecnología de recubrimiento de superficies está experimentando un crecimiento espectacular durante los últimos años debido a la gran cantidad de aplicaciones que surgen cada día en todo tipo de entornos industriales, destacando dentro de estas tecnologías los sistemas de rociado térmico. Estos sistemas consisten básicamente en el rociado térmico de cualquier material (en polvo o alambre) en forma fundida o semi-fundida a través de una pistola (rociador) que le aporta energía cinética y térmica al material por medio de una corriente de gas o de aire comprimido para poder ser impulsado a alta velocidad, con una temperatura determinada contra una superficie (substrato), quedando recubierto por el material impregnado con una adecuada adherencia. (Fig. 3.1)

Dependiendo del material rociado (puede ser cualquier metal, cerámico, aleación, polímero o compuesto), del sistema de rociado térmico elegido y de la parametrización del mismo, obtendremos una superficie con unas características específicas de porosidad, dureza, rugosidad, resistencia al desgaste o a la corrosión.

Las técnicas de rociado térmico, utilizan sistemas de combustión por combustible, plasma rociado y aporte por arco eléctrico. Los recubrimientos pueden aplicarse bajo condiciones atmosféricas normales o en ambientes especializados con un control ambiental altamente controlado. Esta técnica se puede aplicar además en forma manual, mecánica y/o con un robot programado a través de un software.

Por esta flexibilidad que nos ofrece este sistema, podemos conseguir las características superficiales óptimas para las necesidades de cada aplicación, mejorando sensiblemente el rendimiento de la pieza recubierta, según la funcionalidad para la que fue diseñada. Por ejemplo: resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, recuperación de componentes desgastados con la restauración de medidas, control de tolerancias, incremento de propiedades eléctricas, etc.

Las aplicaciones de recubrimientos de superficies por rociado térmico son muy numerosas y aún así cada día se descubren nuevas aplicaciones que suponen una mejora tangible en algún proceso industrial. Por eso muchas industrias en la actualidad utilizan los recubrimientos para prolongar la vida de sus productos, aumentar su eficiencia y reducir costos de producción y de mantenimiento.

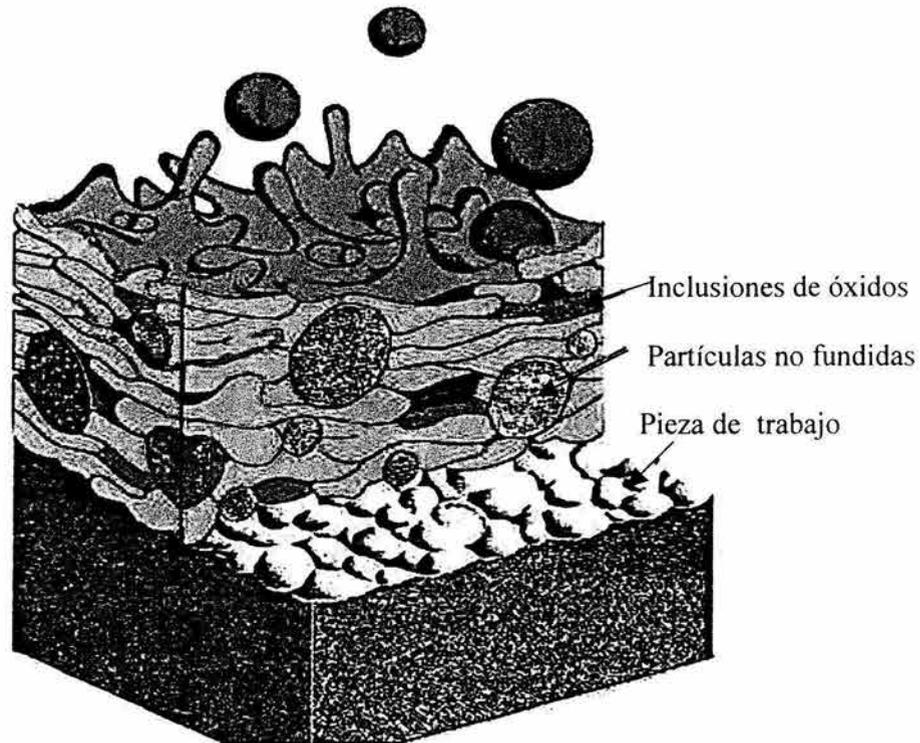


Fig. 3.1 Diagrama esquemático de rociado térmico donde el material es impulsado a alta velocidad y temperatura hacia la pieza de trabajo.

3.2 MATERIALES USADOS PARA RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO.

Los materiales usados para recubrimiento por rociado son principalmente los polvos, barras y alambres. Los últimos son metales o aleaciones que son usados solamente para los procesos de rociado por arco (AS) y rociado por flama (FS- alambre).

También existen otros materiales para recubrimiento mediante rociado térmico como son cintas y recubrimientos mediante selladores (epóxicos o resinas de silicona).

3.3 MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE POLVOS.

Los métodos de fabricación de polvos dependen principalmente del tipo de material que se va a utilizar, como se describe en los siguientes casos:

Los *metales y aleaciones* usualmente se preparan mediante alguno de los métodos de *atomización* y en otras ocasiones por *sinterizado*. Los *óxidos y los cerámicos* son manufacturados por *fusión o sinterizado*, seguido por presión, pero también por métodos de *calcinación*.

La *composición de polvos* se puede hacer por medio de una técnica conocida como la *técnica de revestido*.

Probablemente el método de fabricación de polvos más versátil es el *rociado en seco* que contiene pequeñas partículas de cierto material, que se mantienen unidas en un aglomerado esférico con unión o enlace orgánico. Los polvos preparados de esta forma pueden mejorar su densificación, mediante el sinterizado. Algunas veces, para modificar la composición del polvo, las partículas preparadas en alguno de los métodos anteriormente mencionados son mezcladas.

Algunos de los polvos más usados actualmente son:

-Los metales (molibdeno) y aleaciones (aleaciones autofundentes. Ni ,16 wt. % Cr , 3.5 wt. % Si, 4.5 wt. % Fe, 1 wt. % C).

-Óxidos cerámicos (Al_2O_3).

-Mezclas cerámicas- metálicas (grafito revestido de Ni o WC aglomerado con 12 wt. % Co).

-Carburos ($Cr_2_3C_6$).

-Otros polvos por ejemplo, aleaciones aluminio-silicio aglomerado con 47 wt. % poliamida.

Para los fines del trabajo solo se mencionarán algunas tablas donde se muestran que polvos son fabricados por dichos procesos:

Tabla 3.1 Polvos típicos producidos a partir del método de atomización.

Polvo	Composición Química(wt. %).	Medio de enfriamiento	Tamaño de grano (μm)	Nombre comercial
Metales	Al Ni	Gas Gas	-48+5	Amdry 3033 Valco 2120
Aleaciones	Bal. Ni 20 Cr Bal.Ni 15 Cr, 4.5 Si, 4Fe 3B	agua Gas inerte		Amperit 250 CSM N60

Tabla 3.2 Producción de polvos típicos usando la fusión (sinterizado) y triturado.

Polvos	Composición química (wt.%)	Método de producción	Tamaño de grano (μm)	Nombre comercial
<i>óxidos</i> óxido de cromo	99.5	fusión y triturado		Amperit 704
	Bal. Cr ₂ O ₃ , 5Si O ₂ , 3TiO ₂	Sinterizado y triturado	-120+45	Metco 136 CP
Óxido de aluminio con óxido de titanio	Bal. Al ₂ O ₃ , 3 TiO ₂	Fusión y triturado	-45+22	Amdry 6204
<i>Cementados</i> Carburo de tungsteno con cobalto	Bal. WC, 12Co Bal. WC, 10Co	Fusión y triturado sinterizado y triturado	-74+45	Valco 5101 Al-1071
<i>Carburos</i> Carburos de cromo	Cr ₂ C ₃	Fusión y triturado	-106+30	Amdry 304

Tabla 3.3 Polvos comúnmente producidos usando el método de aglomerado y densificación.

Polvo	Densificado	Composición química (wt%)	Tamaño de grano (μm)	Nombre comercial
Metálico Molibdeno	Sinterizado	Mo		Amperit 102
Cerámicos Cromo - Silice		Bal. Cr_2O_3 , 5 SiO_2	-63 +15	
Zirconia - ytria	Plasma RF	Bal. Zr O_2 , 8 Y_2O_3		Amdry 6610
Cementados Carburo de tungsteno con cobalto		Bal. WC 12Co		Valco 5104

Tabla 3.4 Polvos típicos revestidos

Polvo	Composición química (wt. %)	Tipo de recubrimiento	Tamaño de grano(μm)	Nombre comercial
Níquel aluminio	Bal. Ni, 4.5 Al	Poroso	-88+45	Metco 450
Al 12Si con poliamida	Bal. AlSi, 47 poliamida	Poroso		Amdry
Ni-grafito	6 Enlace Bal. Ni, 40 Grafito	Denso		Amperit 2000

3.4 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE POLVOS.

Los parámetros más importantes son: *tamaño de grano, composición química de fases, forma, porosidad interna (correlacionada con densidad aparente) y grado de fluidez.*

3.4.1 TAMAÑO DE GRANO.

El tamaño de grano de los polvos se determina mediante análisis, utilizando alguno de los siguientes métodos:

- análisis mecánico por tamizado (descrito, en ASTM norma B214-86)
- rayos X.
- dispositivo para dispersión de rayos láser.

Tabla 3.5 Equivalencias entre tamaños de mallas números de ASTM normas: B214-86 y DIN 32529.

Número de malla (ASTM)	Tamaño de grano (tamaño de tamiz) (μm)	Número de designación DIN	Tamaño de grano (μm)
100	150	0	-22.4+5.6
120	125	1	-45+22.4
140	106	2	-90+45
200	74	3	-45+5.6
230	63	4	-63+16
325	44	5	-106+32
400	37	6	-125+45

3.4.2 ANÁLISIS QUÍMICO Y DE FASES.

Los usuarios de polvos están interesados en especial en la siguiente información:

La composición química promedio de varias partículas, la distribución de elementos dentro de las partículas de polvo y, fases cristalinas presentes en los polvos.

3.4.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA.

La composición química de los polvos se puede determinar con el uso de variadas técnicas analíticas. La más común es la llamada emisión de plasma por espectroscopia (ICPES), o la técnica de espectroscopia por fluorescencia de R-X.

3.4.4 DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS.

Las partículas aglomeradas o polvos recubiertos contienen diferentes fases (elementos) y pueden ser de importancia si están distribuidas de forma homogénea ó no en la partícula (polvos aglomerados) o si el recubrimiento cubre la superficie correctamente y en su totalidad. Para obtener esta información es necesario la obtención de un estudio metalográfico de la sección transversal de las partículas de polvo. La distribución en 2D de los elementos se puede obtener mediante la dispersión de rayos X (espectroscopia) (WDS). Estas técnicas de análisis son opcionales para muchos microscopios electrónicos de barrido (SEM).

3.4.5 ANÁLISIS DE FASE.

El análisis de las fases presentes se puede conocer mediante difracción de rayos X. Los equipos modernos están computarizados y equipados con un catálogo de fases cristalinas, lo que facilita la identificación.

3.4.6 MORFOLOGÍA DE LOS GRANOS.

La observación de la forma de los granos permite reconocer la técnica de fabricación. Para obtener información completa sobre la composición del polvo, es necesario observar los granos externos así como los internos. Lo anterior se puede hacer con especímenes preparados por encapsulado del polvo en resina y sucesivamente rectificado y pulido. Los especímenes son observados con un microscopio óptico.

La tabla 3.6 muestra algunos términos que indican las diversas morfologías que se pueden obtener como resultado de la producción de polvos por diversas técnicas.

Tabla 3.6. Correlación entre morfologías internas y externas de grano y método de producción de polvos.

Morfología externa		Morfología interna	
Granos	Técnica	Granos	Técnica
Esferas con superficie densa	Atomización por gas	Esferas sin poros	Gas Atomizador Sol-gel
Esferas con superficie rugosa Periferia irregular	Aglomerado y densificado, Sol-gel	Esferas porosas	Aglomerado
	Rociado-secado	Esferas huecas	Aglomerado ó aglomerado y densificación
Bloque angular	Atomización Agua	Bloque angular denso	Fusión y triturado
		Bloque angular poroso	Sinterizado y triturado Calcinación
		Recubrimiento con revestimiento denso	Revestimiento denso
		Recubrimiento con revestimiento poroso	Revestimiento poroso

3.4.7 DENSIDAD APARENTE Y FACILIDAD DE FLUJO.

Las mediciones de densidad aparente y fluidez están normalizadas, por las normas ASTM B 329-76* y B 213-83** , respectivamente.

La medida de densidad consiste de un muestreo con pesos y volúmenes calibrados en un tazón (0.25cm^3) y la medición de fluidez consiste en medir el tiempo necesario en que fluye una muestra de 50g de una porción de polvo a través de una boquilla calibrada en un tubo de 2.54mm de diámetro.

3.5 TRATAMIENTOS PREVIOS AL ROCIADO TÉRMICO.

Las superficies sometidas a recubrimiento mediante el rociado térmico, deben ser preparadas adecuadamente. A continuación se citan los métodos de preparación más comunes:

- Formado de la pieza (si es necesario), para ser posteriormente cubierta, y luego rectificada hasta obtener la medida deseada.
- Mascarilla, previa a la preparación de superficies rugosas, para proteger aquellas partes que no se les requiera dar rugosidad.
- Rugosidad, preparación de superficies que serán recubiertas.
- Mascarilla, previa al rociado térmico, para proteger aquellas partes que no se deseen recubrir.
- Desengrasado (usando solventes orgánicos comunes, acetona, o algunas veces, vapor como desengrasante -especialmente para piezas grandes).

A continuación se exponen las técnicas y materiales usados en la técnica de la mascarilla.

- La mascarilla previa a la rugosidad es comúnmente hecha con telas, caucho o plástico. Sólo el silicón, o teflón se pueden usar como mascarilla para superficies rugosas o para ciertos procesos de recubrimientos por rociado térmico. Es importante cuidar que la temperatura de la superficie a tratar se mantenga constante si el rociado térmico es lento.
- La mascarilla previa al rociado térmico se hace con metales o cintas de fibra de vidrio, que se cortan a las dimensiones deseadas. También existen líquidos compuestos disponibles en el mercado, que previenen la adhesión de partículas calientes durante el rociado térmico y se pueden disolver con agua después del proceso. Los barrenos y las ranuras en la pieza rociada térmicamente, se pueden proteger con teflón o insertos metálicos.

Las técnicas de preparación de superficie más comunes incluyen lo siguiente:

-La macro-rugosidad, que consiste de cortar hilos en V o cortar ranuras en espiral. Esta técnica podría ser aplicada si el granallado no es recomendable, para obtener una buena adherencia del recubrimiento en superficies grandes. En este caso la macro-rugosidad es seguida de continuo granallado de acabado áspero.

- Preparación de superficie rugosa por agentes químicos, que no es muy frecuente en laboratorios externos debido a la incompatibilidad de fabricación en otros talleres, usa rociadores para recubrir las piezas. Laszlo (1961) ha recomendado un agente compuesto de una parte por volumen del 20% de ácido sulfúrico y tres partes por volumen del 10% de ácido nítrico, para cada superficie de cobre a preparar antes del rociado. Los tiempos de preparación de la superficie rugosa por acción química son de 10 horas [3].

Los aceros inoxidables pueden prepararse usando un agente de dos partes por volumen de ácido nítrico al 40% y tres partes por volumen de ácido clorhídrico al 20%. El tiempo del proceso debe de ser de 10min.

- El Granallado, es la técnica más común para preparar una superficie rugosa que consiste en: Proyectar un abrasivo para dar limpieza y rugosidad a la superficie antes del recubrimiento por medio de la técnica de rociado térmico (Fig. 3.2).

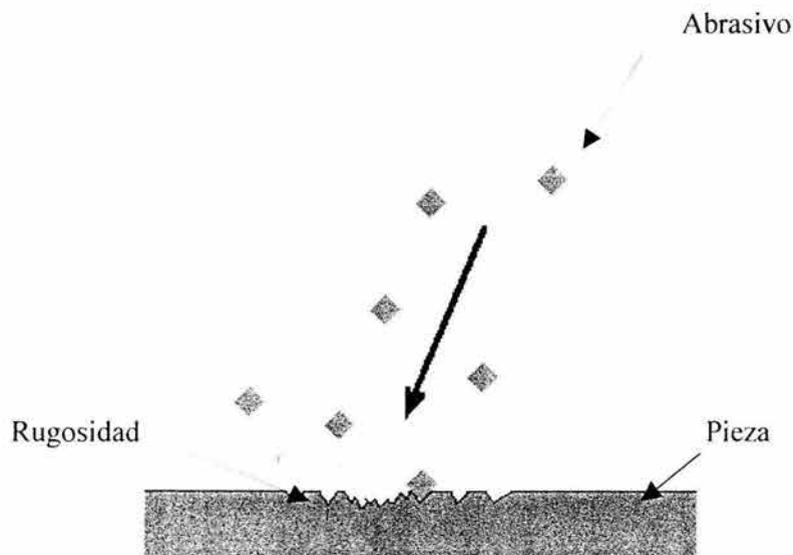


Fig. 3.2. Proyección de un abrasivo hacia la pieza de trabajo.

Los tipos de abrasivos más usados son:

- granos de acero o hierro fundido,
- esferas metálicas,
- arenas cerámicas como sílice, alumina o carburo de silicio.



Fig. 3.3 Óxido de aluminio.

El tamaño del abrasivo depende del espesor de la pieza a granallar, como también del tipo de rugosidad para el área a granallar. Cabe mencionar, que la arena sílica fina generalmente se usa para acabados finos y la alúmina para acabado burdo.

Otro punto importante es la reducción del tamaño de abrasivo debido al proceso de granallado. El abrasivo debe ser cambiado con frecuencia dependiendo de la presión, fuerza de impacto y de la dureza de las piezas a granallar. En la tabla 3.7 se muestran algunas propiedades de diferentes tipos de abrasivos para el granallado.

Tabla 3.7 Propiedades de algunos abrasivos.

Abrasivo	Forma	Dureza MOHS (Rockwell Rc)	Densidad (Lbs/ft ³)	Típica presión de trabajo. (Psi)	Numero de usos Recomendables	Tamaño (Malla)
Óxido de aluminio	angular	8-9 (40-66)	125	20-90	3-5	12-325
Arena de acero	angular	8-9 (40-66)	230	20-90	50-100	10-325
Garnet	angular	8	130	30-80	3-5	16-325

La preparación de las piezas rugosas debe hacerse con mucho cuidado. El granallado de acabado áspero puede crear esfuerzos en la superficie, en consecuencia la pieza sufre deformación después del tratamiento; debido a lo anterior se recomienda en muchas ocasiones el uso de abrasivo fino y baja presión.

Para realizar el proceso de granallado se utiliza un equipo en forma de pistola en donde el abrasivo es alimentado a la boquilla por gravedad o por succión (Fig.3.4 y 3.6a). El aire que proviene del compresor (3) se introduce en la cámara (2), donde se descomprime. Al pasar el aire por la cámara, genera una presión de vacío, que succiona el abrasivo (5) del contenedor (4) y lo transporta a través de la manguera (6) hasta la salida de la boquilla (1). Al salir por la boquilla ésta se impacta al substrato o pieza.

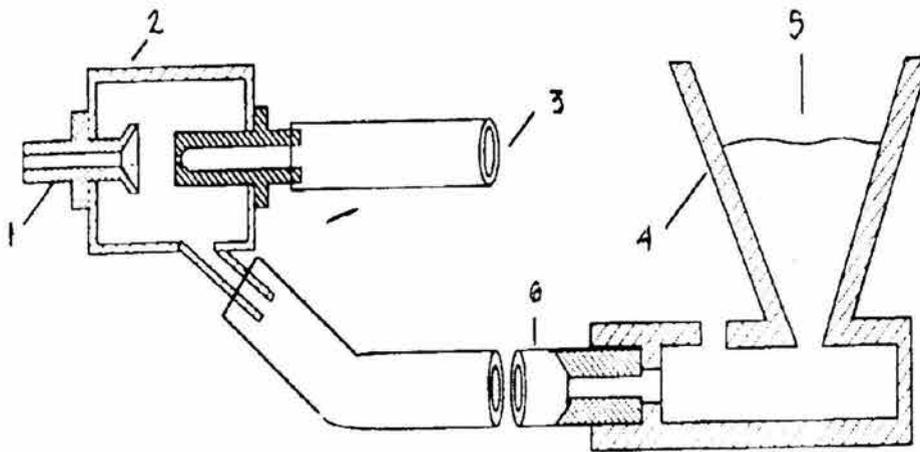


Fig. 3.4 El sistema de succión de granalla: 1, boquilla; 2, cámara de descompresión; 3, entrada de aire comprimido; 4, contenedor de abrasivo; 5, abrasivo; 6, manguera.

Existen en la industria diferentes equipos de granallado, pero los más utilizados son los portátiles, las cabinas y tipo cuartos como se observa en las siguientes figuras.



Fig. 3.5 Granallador Portátil.

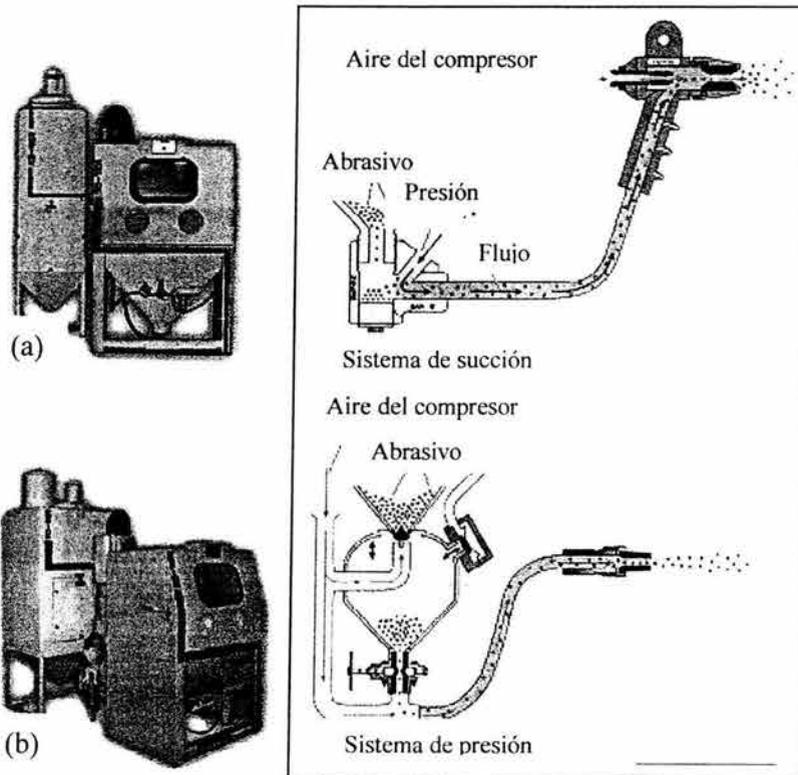


Fig. 3.6 Principales operaciones del sistema de granallado por succión y presión (tipo cabina).

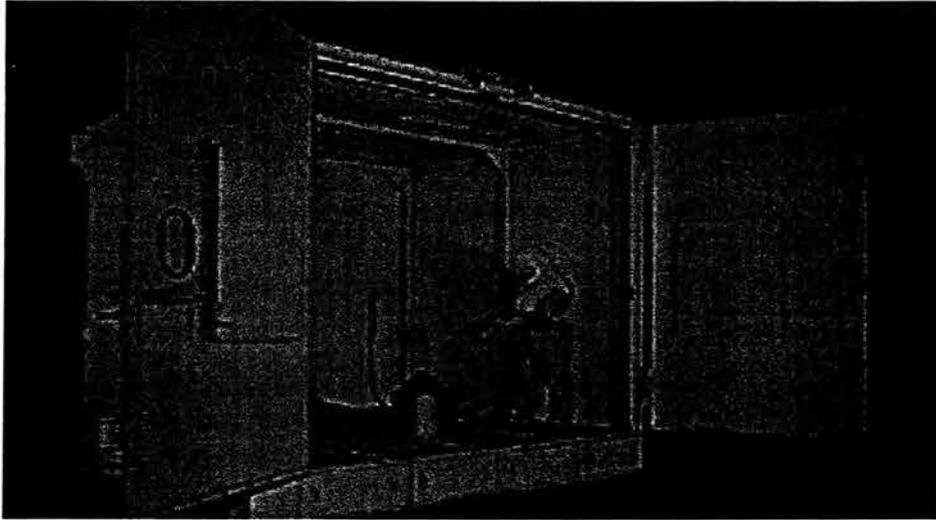


Fig. 3.7 Granallador tipo cuarto.

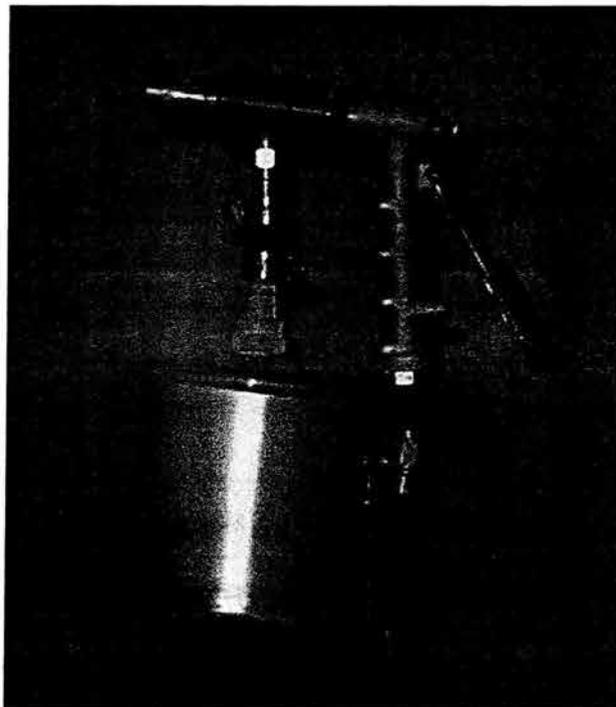


Fig.3.8 Granallador con sistema de succión utilizado en este trabajo.

Es recomendable que el granallado se haga en un área abierta, ya que la acumulación de polvo en un espacio cerrado es dañino para la salud. Sin embargo, para piezas grandes (como coronas o rollos de anilox), se usan boquillas dobles. Estas boquillas tienen dos salidas donde la primera boquilla expulsa el abrasivo y la segunda sirve como recuperador (Fig. 3.9).

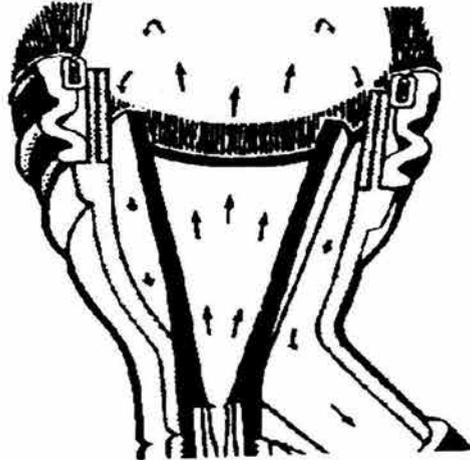


Fig. 3.9 Esquema de una boquilla con recuperación de abrasivo en el granallado abierto.

Actualmente, los sistemas de granallado están automatizados para producción en serie. Los parámetros que intervienen en el granallado son entre otros: tiempo, presión y ángulo de granallado depositado en la superficie rugosa del sustrato. Algunos resultados obtenidos recientemente (Granallado de Inconel 718 con sistema de vacío y abrasivo de alúmina) se exponen en la Fig. 3.10.

El parámetro de la rugosidad de la superficie (R_a) máxima se obtuvo después de un corto tiempo de granallado. El granallado prolongado no genera necesariamente superficies más rugosas (Fig. 3.10a). De forma similar, el granallado sólo permite ángulos menores a 90° , para obtener una superficie rugosa en un corto tiempo. Finalmente, el R_a crece linealmente con el incremento de presión de granallado (Fig. 3.10 b).

Los resultados de Apps son algunas veces contradictorios. El reportó que la adherencia de aluminio rociada térmicamente en acero dulce alcanza un máximo de 25MPa si se usa abrasivo de alúmina, aplicada con un ángulo menor de 25° . Pero una comparación directa de estos resultados no es posible, debido a que los autores utilizaron diferentes parámetros en la investigación del ángulo de granallado (Wigren - Rugosidad, Apps -adherencia), el abrasivo de alúmina puede tener diferente morfología y las condiciones de aplicación no siempre son las mismas. La distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo no influyen en la rugosidad de la superficie hasta un valor dado. La distancia de inicio (250 mm -Wigrwn) permite que la rugosidad disminuya. Finalmente, es importante mantener la rugosidad y proceso de granallado dentro de un intervalo de tiempo corto (no más de unas cuantas horas). Si el tiempo es muy largo, se presentará oxidación que puede afectar la adherencia y calidad del recubrimiento.

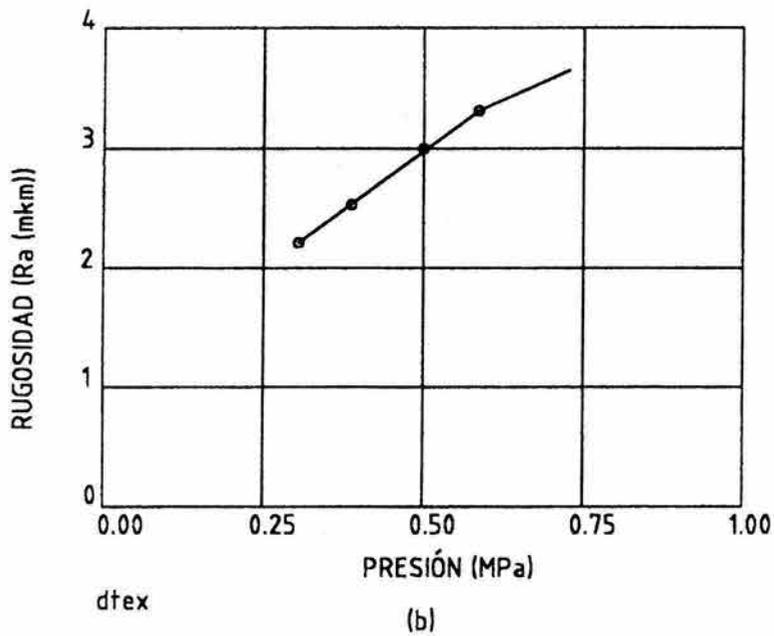
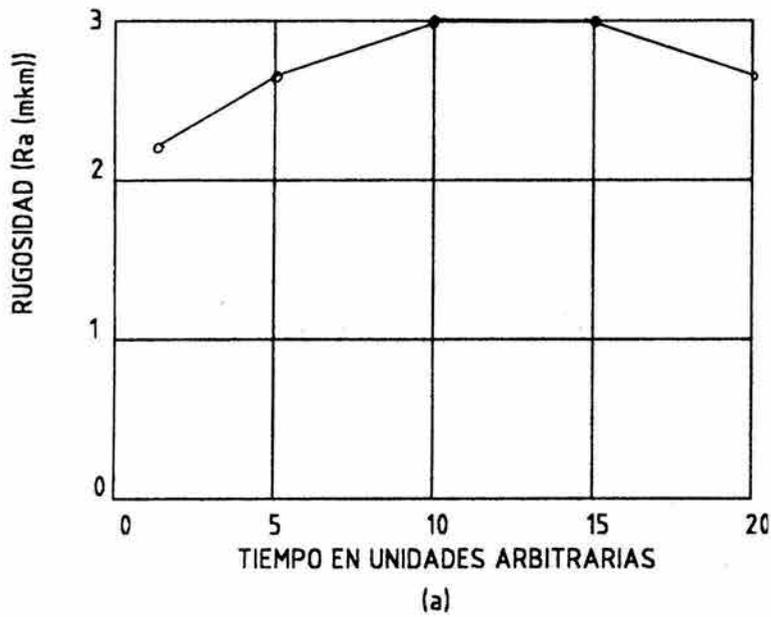


Fig. 3.10 La rugosidad R_a del Inconel 718 substrato alumina usando un alimentador de 2000 g/min, con una distancia de 150 mm y ángulo de 90° (en unidades arbitrarias) (a) y granallado a presión (b).

3.6 TÉCNICAS DE ROCIADO TÉRMICO.

Los procesos o técnicas de Rociado Térmico pueden ser de dos tipos: *Procesos de Combustión o Procesos Eléctricos*, los cuales a su vez tienen otras subdivisiones que se mencionan a continuación.

- **Procesos de Combustión**

Rociado por Flama.

Rociado por HVOF

Rociado por Detonación.

- **Procesos Eléctricos**

Proyección al Arco Eléctrico.

Proyección de Plasma.

Todas estas técnicas de rociado térmico dependen principalmente de la combustión de los gases o plasma, de la fuente de energía térmica y de la energía cinética de las partículas, así como del impulso de las partículas hacia la pieza o sustrato. A su vez las propiedades de los recubrimientos son importantes en la selección de la técnica de rociado térmico a aplicar.

Estas técnicas de rociado térmico están basadas según su utilidad en la industria. La descripción de las técnicas que a continuación se presentan incluyen la historia de la técnica, sus principios, mecanismo, parámetros más importantes, propiedades del recubrimiento tales como porosidad, máximo espesor, fuerza de unión (adherencia), etc.

3.6.1 ROCIADO TÉRMICO POR FLAMA (FS)

Es la forma más antigua de rociado térmico (1909 Max Ulrich Schoop obtiene la patente de los recubrimientos utilizando el proceso de combustión (gas, oxígeno) de alambre, 1956 Metco lanza al mercado las pistolas Tipo P para el rociado térmico por flama de polvos, hacen su debut los recubrimientos cerámicos refractarios, aleaciones autofundentes y carburos de tungsteno). La energía química de combustión del gas por ejemplo (acetileno con el oxígeno) se usa para el calentamiento y la fusión del material. El material es alimentado continuamente hacia la pistola donde es fundido en una llama de combustible gaseoso y propulsado hacia el sustrato en una corriente de gas atomizante. El aire es generalmente utilizado como gas atomizante. Un esquema del rociado térmico por flama de polvos se muestra en la figura 3.11

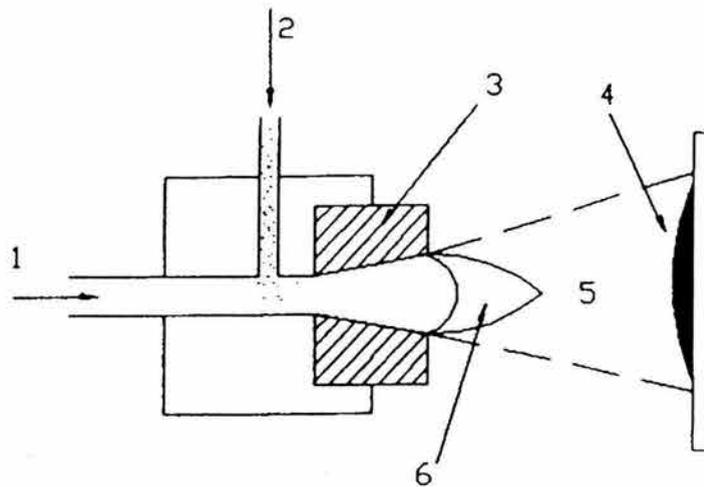


Fig. 3.11 Esquema de rociado térmico por flama (FS). 1, Flujo de los gases (combustible y oxígeno); 2, inyección de polvos; 3, protección del soplete; 4, recubrimiento; 5, corriente de partículas; 6 combustión de la flama.

Los gases penetran axialmente (1), los polvos (2) pueden ser introducidos axialmente o perpendicularmente hacia el soplete (3). También pueden ser usados alambres en lugar de polvos. Las partículas son fundidas en la flama (6) y aceleradas en dirección de la pieza de trabajo (4).

La instalación de un sistema de rociado por flama de polvos y de alambre es relativamente económico y móvil, para su instalación solo se requiere una antorcha de rociado por flama y una fuente de oxígeno y gas combustible (Fig. 3.12a, Fig. 3.12b) debido a sus bajas velocidades de proyección de partículas comparado con otros procesos de rociado térmico, este tipo de recubrimientos generalmente es de menor calidad, tienen alta porosidad y bajas fuerzas cohesivas y adhesivas.

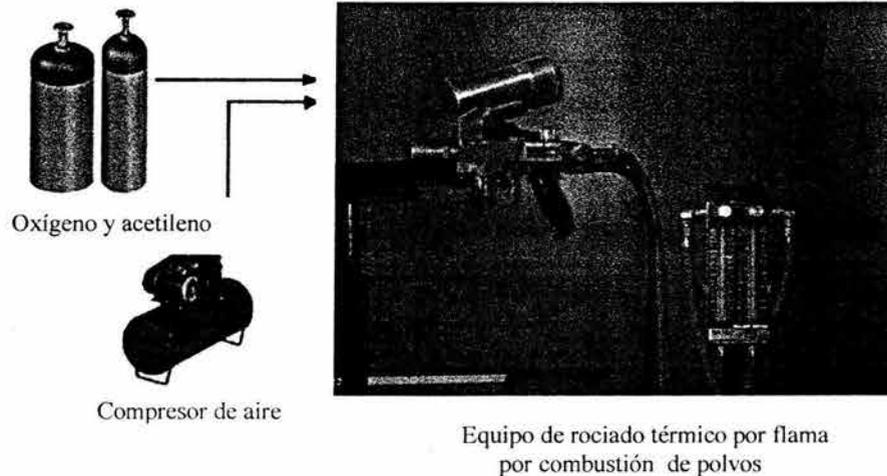


Fig. 3.12a Diagrama de instalación del rociado térmico por flama de polvos.

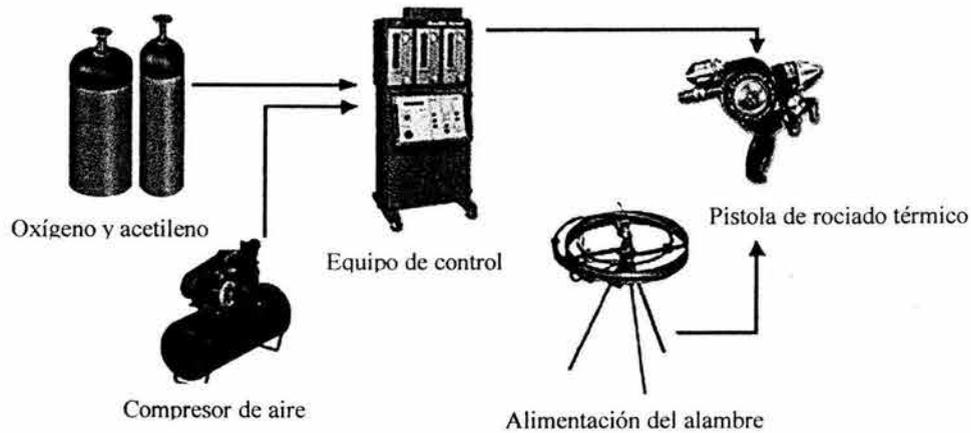


Fig. 3.12b Diagrama de instalación del rociado térmico por flama de alambre.

El rociado térmico por flama a través de la combustión de polvos ha sido usado por décadas por varias industrias con economía y confiabilidad de las superficies obtenidas con este proceso.

Las características y beneficios que nos ofrece el proceso de rociado térmico por combustión de polvos son:

- Económico y larga vida útil.
- Fácil operación.
- Versatilidad y confiabilidad.
- Relativamente bajo ruido de operación.
- Gran variedad de materiales para recubrimientos.
- Alta producción de recubrimientos.
- El proceso puede ser automatizado.
- Portabilidad.

Las típicas aplicaciones del proceso de rociado térmico por combustión de polvos son las siguientes:

- Reconstrucción y salvamento de piezas.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al desgaste.
- Resistencia al impacto.
- Resistencia al ataque químico.
- Control de la corrosión a temperatura ambiente.
- Control de la corrosión a altas temperaturas.

Las características y aplicaciones del proceso de rociado térmico por combustión de alambre se muestran en la Tabla 3.8.

Parámetros del proceso:***Flama:***

- La relación del oxígeno y combustible puede variar de 1:1 a 1.1:1, resultando una temperatura de flama entre 3000 K - 3350 K y una velocidad de 80 - 100 m/s.
- La razón de flujo del combustible y la presión dependen del tipo de soplete
- El flujo del oxígeno y la presión dependen del tipo del soplete.

Polvos:

- Composición química.
- Propiedades físicas (especialmente: densidad, punto de fusión, calor latente de fusión).
- Forma de las partículas: Es deseada de forma esférica, para facilitar el manejo de los polvos.
- Tamaño de las partículas (polvos) usualmente en el rango de 5- 100 μ m

Inyección de polvos:

- En los antiguos sopletes los polvos fueron inyectados verticalmente, pero en los modernos sopletes la inyección es axial.
- En los antiguos sopletes la alimentación fue gravitacional. En instalaciones modernas, podrían ser alimentados como en las instalaciones de la técnica de rociado térmico por plasma atmosférico (APS), que se describe más adelante.
- La velocidad de alimentación de los polvos se encuentra en el rango de 50 - 100 g/min

Características del proceso de rociado térmico:

- Distancia de rociado térmico: 120 - 250mm
- Ángulo de rociado térmico: Usualmente a 90°, algunas veces diferentes de lo normal debido a la forma del sustrato.
- Rociado térmico atmosférico: al aire.

Pieza o sustrato:

- Composición química.
- Preparación de la superficie.
- Mascarilla de la superficie.
- Temperatura de la superficie: Es de importancia en el rociado térmico de cerámicos sobre los metales debido a la generación de esfuerzos residuales.

Propiedades del recubrimiento:

La adherencia puede alcanzar una resistencia de 60 MPa para un rociado térmico de NiAl, o aproximado a 70MPa para un rociado térmico de aleaciones autofundentes. Los valores típicos se encuentran en el rango de 15 - 30 MPa para recubrimientos cerámicos. La porosidad se encuentra en el rango de 10%-20% (podría no tener porosidad para un recubrimiento con aleaciones autofundentes) y espesores típicos están en el rango de 100-2500 μm .

En las siguientes figuras se muestra el equipo utilizado en el proceso de proyección por flama de polvos:

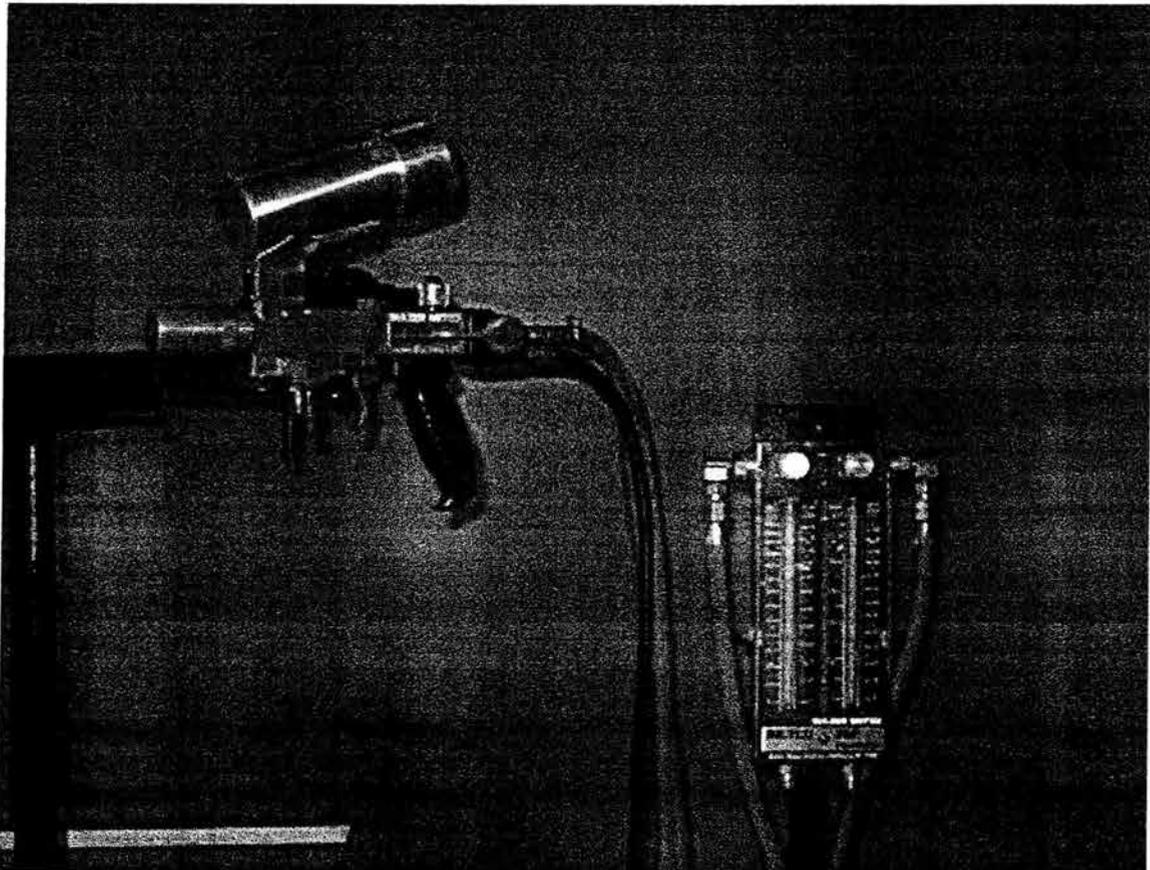


Fig. 3.13 Equipo de rociado térmico por flama (pistola 5P-II con fluxometro)

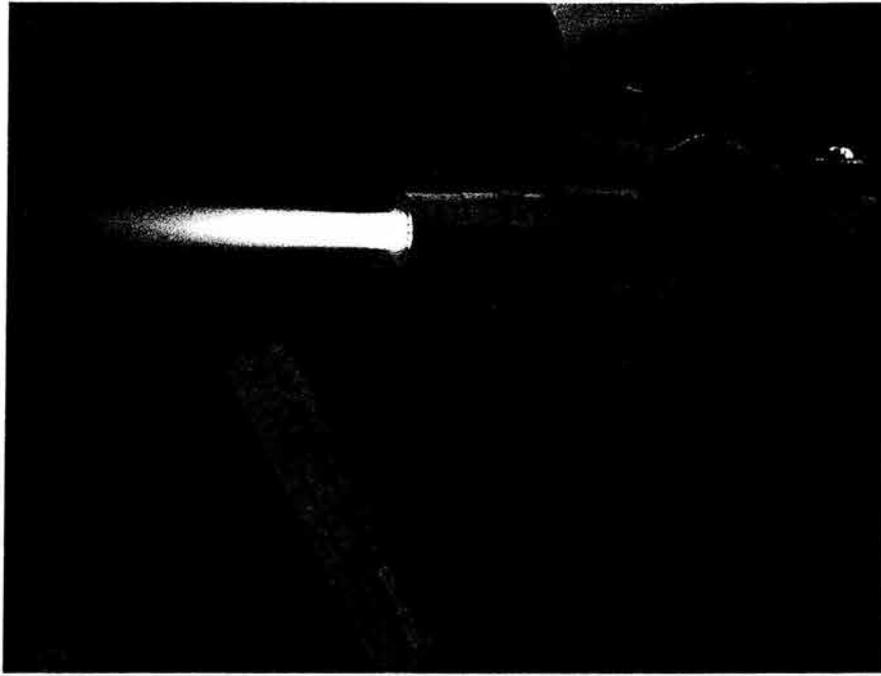


Fig. 3.14 Regularización de la flama.

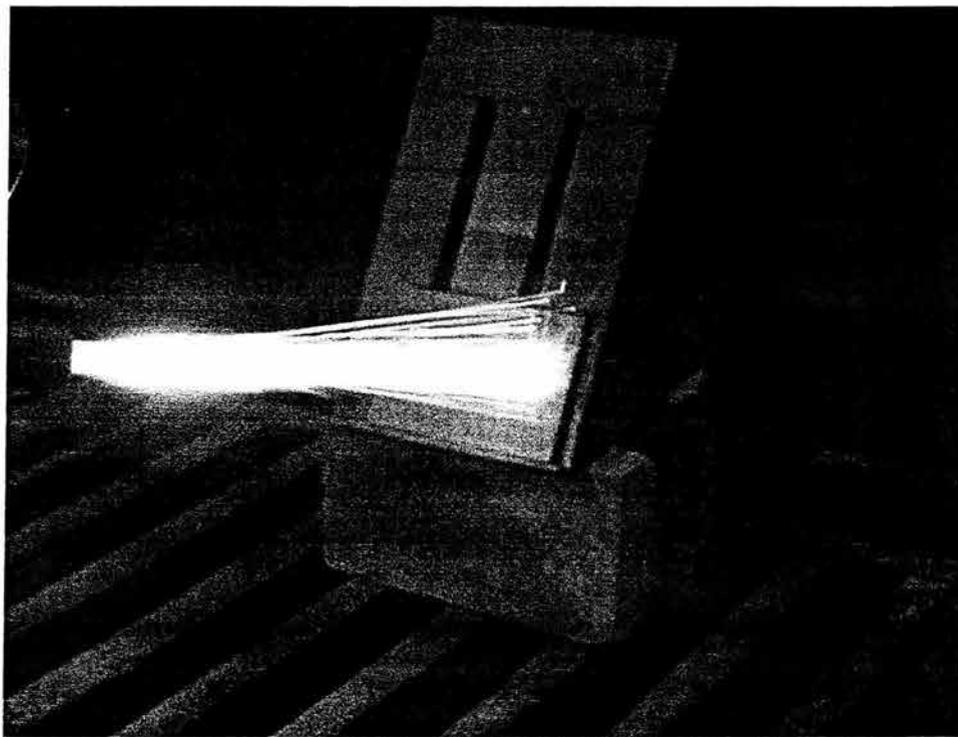


Fig. 3.15 Proceso de rociado térmico por flama.

3.6.2 ROCIADO TÉRMICO POR PLASMA ATMOSFÉRICO (APS)

Historia:

El soplete de rociado térmico por plasma se basa sobre el tipo generador de plasma (Gerdien y Lotz, 1922). El proceso de rociado térmico con el uso del plasma fue patentado por Gage (1962) y Giannini y Ducati (1960).

Principio:

El generador de plasma mostrado en la figura. 3.16, consiste de un ánodo circular (1) usualmente de cobre, y un cátodo de tungsteno (2). El arco eléctrico se genera entre ellos y es soportado por un generador por medio de los conectores (3,4) elevando la temperatura de los gases (5), los cuales se expanden hacia la atmósfera formando una reacción. Los polvos (6) suspendidos en el portador de gas son inyectados en la flama. Las partículas de los polvos son fundidas y aceleradas en el plasma, impactándose hacia la pieza y formando el recubrimiento.

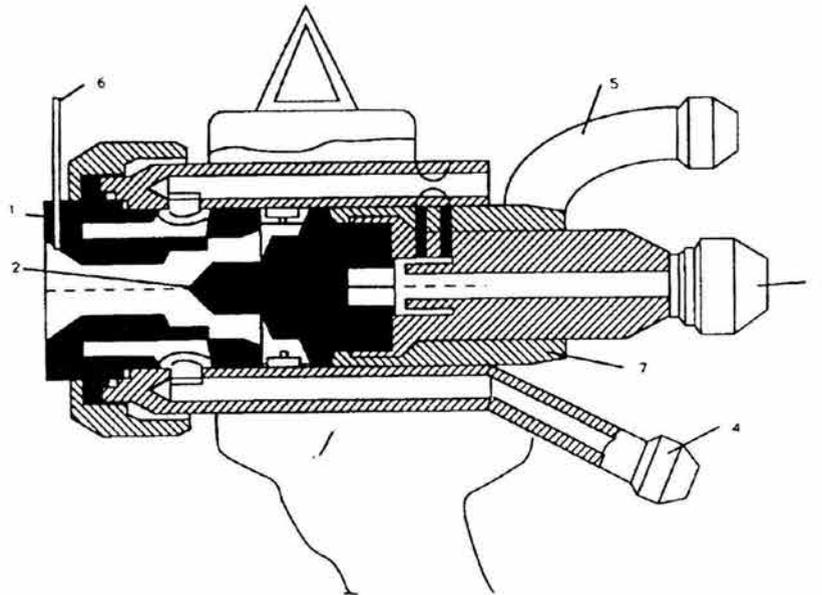


Fig.3.16 Sección típica de rociado térmico por plasma: 1 ánodo; 2cátodo; 3 salida del agua y conector del cátodo; 4 entrada del agua y conector del ánodo; 5 entrada de los gases de trabajo; 6 inyector de polvos; 7 aislador eléctrico.

Parámetros del proceso:***Plasma por arco:***

Gases de trabajo: Típicamente Ar o una mezcla de Ar+H₂ , Ar+He y Ar+N₂ algunas veces N₂ y una mezcla de N₂+H₂. La temperatura del plasma alcanza los 14000 K y la velocidad en la salida de la boquilla alcanza los 800 m/s o más. La selección de los gases dependerá de la habilidad para fundir las partículas que serán rociadas térmicamente.

Potencia eléctrica: Típicamente arriba de los 60 kW en algunas instalaciones, sin embargo, puede alcanzar mas de 100kW.

Geometría de los electrodos: La forma de la punta del cátodo dependerá de los diferentes gases de trabajo. La forma y el diámetro del ánodo influye en el diseño del flujo del plasma y por consiguiente en la temperatura de reacción del plasma y velocidad de distribución. Como el arco está en contacto con el ánodo y cátodo en uno o más puntos, es necesario diseñar el cátodo y ánodo para prevenir su rápido deterioro.

Polvos:

- Composición química
- Propiedades físicas(especialmente: densidad, punto de fusión, calor latente de fusión, etc).
- Forma de las partículas: Es deseada de forma esférica, para facilitar el manejo de los polvos.
- Tamaño de las partículas (polvos):usualmente en el rango de 5- 100µm.

Inyección de Polvos:

- Alimentación de los polvos: Por gravedad, por vibración, etc.
- Razón de alimentación: Usualmente se encuentra en el rango de 50-100 g/min
- Ángulo de inyección: Usualmente 90°.
- Orificio de inyección: Puede estar localizado en el interior (para materiales refractarios) o afuera de la boquilla. La longitud y diámetro del orificio influye en la velocidad de inyección de los polvos.

Características de rociado térmico:

- Distancia de rociado térmico: Típicamente en el rango de 60 - 130mm.
- Ángulo de rociado térmico: Usualmente 90°, algunas veces diferentes de lo normal debido a la forma del sustrato.
- Rociado térmico atmosférico: aire.

Pieza:

- Composición Química.
- Preparación de la superficie.
- Mascarilla del sustrato.
- Temperatura del sustrato: Es de importancia en el rociado térmico de cerámicos sobre los metales debido a la generación de esfuerzos residuales.

Propiedades del recubrimiento:

La adherencia alcanzada en el rociado térmico por plasma para cerámicos se encuentra en el rango de 15 -25 MPa y para las aleaciones (como NiAl o NiCrAl) o metales (Mo) pueden llegar a 70 MPa. La porosidad del recubrimiento (APS) se encuentra de 1-7%. El espesor del recubrimiento se encuentra en el rango de 50-500 μ m.

3.6.3 ROCIADO TÉRMICO POR ARCO (AS).

Esquema de rociado térmico por arco (AS) figura 3.17. Dos alambres(5), los cuales son electrodos consumibles, son alimentados por un carrete, el calentamiento del arco permite que los alambres se fundan (formando una gota) (4), después son atomizados por un compresor para formar el recubrimiento. La reacción del gas (1) actúa para atomizar los alambres fundidos y propulsar (3) las finas partículas hacia la pieza.

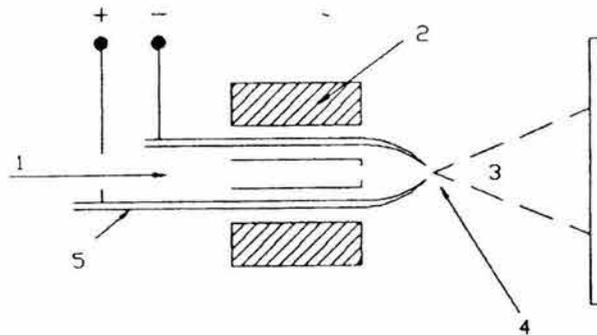


Fig. 3.17 Esquema de rociado térmico por arco. 1, gas atomizador; 2 protección del soplete, corriente de las partículas fundidas; 4, arco eléctrico; 5, electrodos consumibles.

Parámetros del proceso:

Alambres:

- Materiales: Todo material eléctrico. Generalmente son Zn y Al, pero en la actualidad hay un extenso uso de alambres con núcleo.
- Diámetro de 2-5mm
- Las partículas formadas por la fusión de los alambres pueden alcanzar velocidades de 150 m/s.

Arco eléctrico:

- Potencia eléctrica: 5-10 kW.
- Temperatura del arco: puede alcanzar los 6100 K para una corriente de 280 A.
- Voltaje del arco: típicos valores de 20-40V, un crecimiento de voltaje ocasionaría un crecimiento del tamaño de gota.

Características de rociado térmico:

- Razón de depósito: 50-300 g/min.
- Distancia de rociado térmico: 50-170mm.
- Rociado térmico atmosférico: aire, reactivo, inerte, vacío.
- Presión del gas atomizador: 0.2-0.7 MPa.
- Razón de flujo del gas atomizador: 1-80 m³/h.

Propiedades del recubrimiento:

La adherencia se encuentra en el rango de 10-30 MPa para recubrimientos de Zn y Al y pueden alcanzar los 70 MPa para recubrimientos de NiAl. La porosidad se encuentra en el rango de 10-20%. Típicamente su espesor se encuentra de 100-1500 μm .

3.6.4 ROCIADO TÉRMICO POR DETONACIÓN.

Historia:

El proceso de detonación por pistola fue desarrollado por Poorman al inicio de los años 50's. Después en 1960 fue desarrollado en la Unión Soviética por el grupo de G.V. Samsonov [3].

Principio:

La detonación por pistola se muestra en la figura 3.18. Consiste de un largo cañón enfriado por agua con un diámetro interior aproximado de 25mm. En operación una mezcla de oxígeno (4) y acetileno (5) son alimentados dentro del cañón junto con una porción de polvos (1). El gas es inyectado y la onda detonada impulsa las partículas aproximadamente a 750m/s. Hay de 1-15 detonaciones por segundo con limpieza de nitrógeno entre ellas. En la figura 3.19 se muestra un nuevo desarrollo de la Superdetonación por pistola.

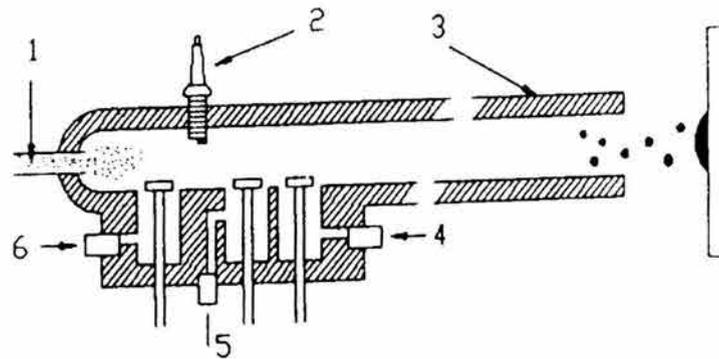


Fig.3.18 Esquema de la detonación por pistola: 1 inyección de polvos; 2 bujía; 3cañón de la pistola; 4 entrada del oxígeno; 6 entrada del nitrógeno (reproducido por Praxair S.T, Indianapolis)

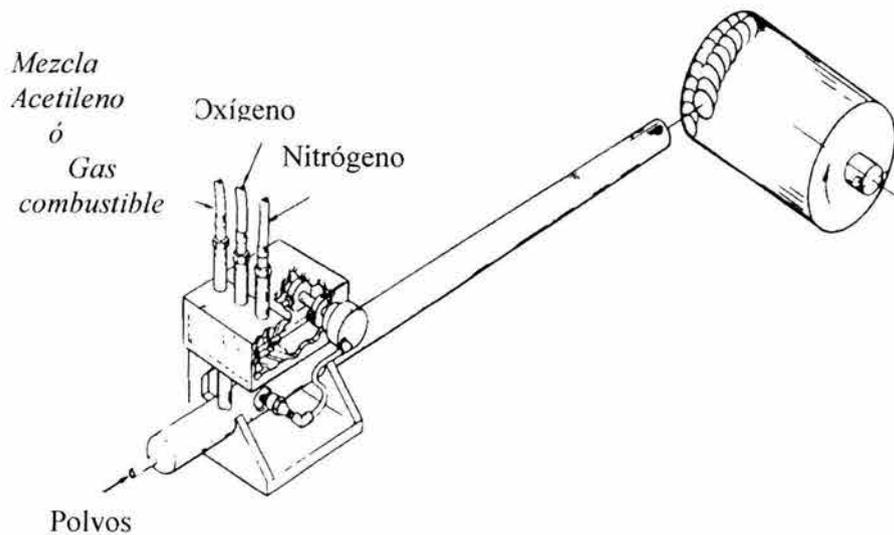


Fig. 3.19 Esquema de la super-detonación por pistola(reproducido por Praxair S.T.,Indianapolis).

Parámetros del proceso:***Detonación:***

-La utilización de los gases son una mezcla de acetileno (Detonación por pistola y super-detonación por pistola) ó propano-butano con oxígeno. La máxima temperatura es de 4500 K con un 45% de acetileno. La detonación de onda consigue una velocidad de 2930 m/s y la velocidad de las partículas alcanzan los 750 m/s en la detonación por pistola y 900 m/s en la super-detonación por pistola.

-Geometría del cañón: La longitud del cañón se encuentra de 450-1350mm, con un diámetro de 21-25mm.

Polvos:

- Tamaño de las partículas: 5-60 μm .
- Otros parámetros como la técnica APS.

Inyección de polvos:

Alimentación de polvos: 16-40 g/min.
Gas transportador: nitrógeno o aire.

Características de rociado térmico:

Distancia de rociado térmico: 100mm
Ángulo de rociado térmico: se pueden encontrar ángulos menores que en la técnica APS.
Rociado térmico atmosférico: aire
Espesor por ciclo en un punto: 3-10 μm

Propiedades del recubrimiento:

La porosidad del recubrimiento por detonación por pistola es aproximada al 0.5% para WC-Co y al 2% para Al_2O_3 y la adherencia es de 83 MPa y 70 MPa respectivamente. Típicamente el espesor es de 300 μm .

3.6.5 ROCIADO TÉRMICO (OXÍGENO-COMBUSTIBLE) ALTA VELOCIDAD (HVOF)

Historia:

El soplete HVOF fue desarrollado a finales de los 70's y al inicio de los 80's.

Principios:

En el proceso HVOF (Fig. 3.20) el combustible (5) es quemado con oxígeno (4) a una alta presión y generando una velocidad alta en el escape. Los polvos son inyectados axialmente dentro del escape (1). Los gases son quemados dentro de la cámara de combustión (2). La cámara de combustión y la boquilla son enfriados por agua (3). Un moderno soplete HVOF se muestra en la figura 3.20.

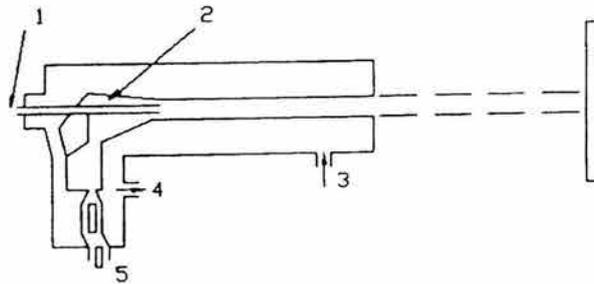


Fig. 3.20 Esquema del soplete HVOF: 1 inyección de polvos; 2 cámara de combustión; 3 agua de enfriamiento; 4 entrada de oxígeno; 5 entrada del combustible.

Parámetros del proceso:

Flama:

Gases de utilización como acetileno, propano, propileno, hidrógeno mezclado con oxígeno. La razón de flujo del gas determina la temperatura de la flama. La temperatura de oxígeno-acetileno puede alcanzar un máximo de 3440 K si la mezcla es 1.5 a 1 (por volumen) y oxígeno-propileno puede alcanzar un máximo de 3170 K a razón de 4:1.

Polvos:

- El tamaño de las partículas usadas en el proceso HVOF usualmente se encuentran de 5 - 45 μm .
- Generalmente son carburos.
- Otros parámetros como la técnica APS.

Inyección de polvos:

- La razón de alimentación de polvos se encuentra de 20-80g/min.
- Generalmente la inyección de polvos es axialmente, en algunos es radial y el nitrógeno es usado como gas transportador.

Características de rociado térmico:

- Distancia de rociado térmico: 150-300mm
- Otros parámetros como la técnica APS.

Pieza:

Los parámetros como la técnica APS.

Propiedades del recubrimiento:

La adherencia de los carburos por la técnica HVOF se encuentra en 90MPa. La porosidad se encuentra por abajo del 1%. Típicamente su espesor se encuentra de 100 - 300 μ m.

3.6.6 ROCIADO TÉRMICO POR PLASMA EN VACÍO(VPS)

Algunas veces llamado rociado térmico de baja presión por plasma(LPPS). Muehlberger fue el autor de esta técnica. Después de varios años, la técnica fue utilizada para producir solamente recubrimientos de cobre y tántalo en aplicaciones electrónicas [3].

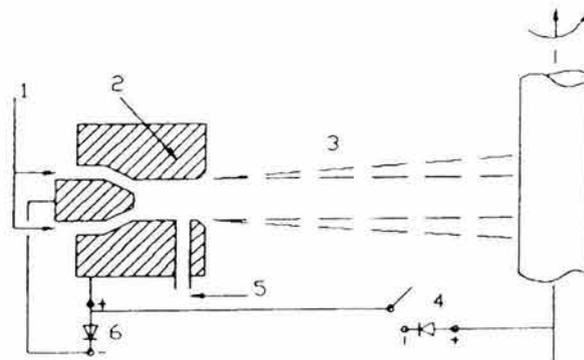


Fig. 3.21 Esquema de rociado térmico por plasma en vacío: 1 Entrada de los gases; 2 ánodo; 3 contorno en vacío; 4 transferencia del arco generador (es usado para el calentamiento previo al rociado térmico); 5 puerta de inyección de polvos; 6 arco generador de plasma.

La instalación de VPS (Fig. 3.21) está compuesta de un soplete de plasma con una boquilla de vacío (2) abastecido por los gases de trabajo (1) y un generador de arco eléctrico (6). Los polvos son introducidos por una puerta (5) hacia la reacción de plasma en vacío.

Parámetros del proceso:

Gases de trabajo: Ar mezclado con H₂, He ó N₂. La temperatura de los electrones (T_e) se encuentra en el rango de 10000-15000 K y la velocidad de plasma se encuentra de 1500-3500 m/s.

Potencia eléctrica: Típicamente arriba de los 80kW.

Polvos:

- Tamaño de las partículas: 5-20µm
- Otros parámetros como la técnica APS.

Inyección de polvos:

Es de importancia la posición de la boquilla en la inyección de polvos. En algunas posiciones la distribución de presión dentro de la boquilla es imposible inyectar los polvos. Esto es debido a la presión en la boquilla y podría ser mas alta que la presión de alimentación de polvos.

Características de rociado térmico:

- Distancia de rociado térmico: 300-400mm.
- Rociado térmico atmosférico: vacío (Presión antes del rociado 1.3 Pa, presión durante el rociado 655 Pa- 13.3KPa.).

Pieza:

- La transferencia del arco del precalentamiento es posible usando substratos (piezas) conductores eléctricos.
- Otros parámetros como la técnica APS.

Propiedades del recubrimiento:

La adherencia en aleaciones es aproximada a 80Mpa. La porosidad se encuentra en el rango de 1-2%. Típicamente su espesor se encuentra de 150-500µm.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes procesos de proyección térmica donde se mencionan sus características, beneficios y principales aplicaciones [II]:

Tabla 3.8 Características de los procesos de proyección térmica.

Proceso	Características y Beneficios	Típicas aplicaciones
Rociado térmico por combustión de polvos.	Económico y larga vida útil. Fácil operación. Versatilidad y confiabilidad. Relativamente bajo ruido de operación. Gran variedad de materiales para recubrimientos. Alta producción de recubrimientos. El proceso puede ser automatizado. Portabilidad.	Reconstrucción y salvamento de piezas. Resistencia a la abrasión. Resistencia al desgaste. Resistencia al impacto. Resistencia al ataque químico. Control de la corrosión a temperatura ambiente. Control de la corrosión a altas temperaturas.
Rociado térmico por combustión de alambre.	Excelente economía. Versatilidad y confiabilidad. Fácil operación. Diversas piezas recubiertas con mínimos accesorios. Alta producción de recubrimientos. El proceso puede ser automatizado. Portabilidad.	Control de la corrosión a temperatura ambiente. Control de la corrosión a altas temperaturas. Reconstrucción y salvamento de piezas.
Rociado térmico de alambre por arco eléctrico	Requiere mínimas instalaciones. Muchas piezas pueden ser recubiertas. No requiere suministro de gas combustible. La alimentación del alambre es automática. Versatilidad y confiabilidad. Fácil operación. Diversas piezas pueden ser recubiertas. Recubrimientos con excelente adherencia y buena densidad. Alta producción de recubrimientos. Los recubrimientos obtenidos son fáciles de maquinar. El proceso puede ser automatizado. Portabilidad.	Control de la corrosión a temperatura ambiente. Control de la corrosión a altas temperaturas. Reconstrucción y salvamento de piezas. Recubrimientos con conductividad eléctrica. Recubrimientos antideslizantes.

Proceso	Características y Beneficios	Típicas aplicaciones
Rociado térmico (oxígeno-combustible) alta velocidad (HVOF)	<p>Recubrimientos con excelente unión.</p> <p>Recubrimientos con baja oxidación.</p> <p>Denso con baja porosidad.</p> <p>Recubrimientos con espesores muy grandes.</p> <p>Mejoramiento en la microdureza.</p> <p>Excelente maquinabilidad de las superficies.</p> <p>El proceso puede ser automatizado.</p> <p>Excelentes fuerzas de adherencia.</p> <p>Superior adhesión.</p>	<p>Reconstrucción y salvamento de piezas.</p> <p>Resistencia a la abrasión.</p> <p>Resistencia a la erosión.</p> <p>Resistencia al desgaste.</p> <p>Resistencia a los efectos de cavitación.</p> <p>Resistencia al ataque químico.</p> <p>Control de oxidación.</p> <p>Control de azufre.</p> <p>Control de la corrosión a temperatura ambiente.</p> <p>Control de la corrosión a altas temperaturas.</p>
Rociado térmico por plasma.	<p>Alto grado de flexibilidad.</p> <p>Versatilidad.</p> <p>Gran variedad de materiales para recubrimientos.</p> <p>Alta producción de recubrimientos.</p> <p>El proceso puede ser automatizado.</p>	<p>Reconstrucción y salvamento de piezas.</p> <p>Resistencia a la abrasión.</p> <p>Resistencia a la erosión.</p> <p>Resistencia al desgaste.</p> <p>Resistencia a los efectos de cavitación.</p> <p>Resistencia al impacto.</p> <p>Resistencia al ataque químico.</p> <p>Control de oxidación.</p> <p>Control de azufre.</p> <p>Control de la corrosión a temperatura ambiente.</p> <p>Control de la corrosión a altas temperaturas.</p> <p>Instalaciones térmicas y eléctricas.</p> <p>Margen de control.</p>
Rociado térmico por baja presión de plasma (LPPS)	<p>Excelente unión metalúrgica.</p> <p>Recubrimientos muy delgados y densos, incluyendo películas delgadas.</p> <p>Recubrimientos libres de oxidación.</p> <p>Recubrimientos y piezas libres de contaminación.</p> <p>Las propiedades de los recubrimientos obtenidos son únicas.</p> <p>Bajo ruido de operación.</p> <p>Gran variedad de materiales para recubrimientos.</p> <p>Alta producción de recubrimientos.</p> <p>Operación en ambientes controlados.</p> <p>Proceso automatizado y continuo.</p>	<p>Resistencia a la corrosión.</p> <p>Resistencia a la oxidación.</p> <p>En recubrimientos de alta pureza y biomédicos.</p> <p>Recubrimientos de alta calidad.</p> <p>Recubrimientos sobre fibra reforzada.</p> <p>Resistencia al ataque químico.</p> <p>Aplicación en películas delgadas.</p>

Tabla 3.9 PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS [II]

Comparación de los principales procesos del rociado térmico

Tipo de recubrimiento.	Rociado térmico por combustión de alambre	Rociado térmico por combustión de polvos	Rociado térmico por (HVOF)	Rociado térmico de alambre por arco eléctrico	Rociado térmico por plasma	Rociado térmico por cámara
Temperatura de los gases 10³ °C (10³ °F)						
En todos los recubrimientos	3 (5.4)	3 (5.4)	2 - 3 (3.6 - 5.4)	N/A	12 - 16 (21.6 - 28.8)	10 - 80 (18 - 144)
Fuerza de adherencia MPa (10³ psi)						
Metales ferrosos	14 - 28 (2 - 4)	14 - 21 (2 - 3)	48 - 62 (7 - 9)	28 - 41 (4 - 6)	22 - 34 (3 - 5)	100 - 400 (14 - 57)
Metales no ferrosos	7 - 34 (1 - 5)	7 - 34 (1 - 5)	48 - 62 (7 - 9)	14 - 28 (2 - 7)	14 - 28 (2 - 7)	400 - 750 (57 - 107)
Aleaciones autofundentes	---	83+ (12+)	62 (9)**	---	---	---
Cerámicos	---	14 - 32 (2 - 5)	---	---	21 - 41 (3 - 6)	25 - 55 (4 - 8)
Carburos	---	34 - 48 (5 - 7)	83+ (12+)	---	55 - 69 (8 - 10)	500 - 100 (9 - 14)
% de la Densidad teórica						
Metales ferrosos	85 - 90	85 - 90	95 - 98+	85 - 95	90 - 95	97 - 99+
Metales no ferrosos	85 - 90	85 - 90	95 - 98+	85 - 95	90 - 95	97 - 99+
Aleaciones autofundentes	---	100*	98+**	---	---	---
Cerámicos	---	90 - 95	---	---	90 - 95+	95 - 98
Carburos	---	85 - 90	95 - 98+	---	90 - 95+	95 - 98+
Dureza						
Metales ferrosos	84R _b -35R _c	80R _b -35R _c	90R _b -45R _c	85R _b -40R _c	80R _b -40R _c	30R _c -50+R _c
Metales no ferrosos	95R _h -40R _c	30R _h -20R _c	100R _h -55R _c	40R _h -35R _c	40R _h -50R _c	45R _c -55R _c
Aleaciones autofundentes	---	30 - 60R _c	50 - 60R _c	---	---	---
Cerámicos	---	40 - 65R _c	---	---	45 - 65R _c	50 - 70+R _c
Carburos	---	45 - 55R _c	55 - 72R _c	---	50 - 65R _c	50 - 70+R _c
Permeabilidad						
Metales ferrosos	Alta	Media	Despreciable	Media	Media	Ninguna
Metales no ferrosos	Alta	Media	Despreciable	Media	Media	Ninguna
Aleaciones autofundentes	---	Ninguna	Despreciable*	---	---	---
Cerámicos	---	Media	---	---	Baja-Media	Despreciable
Carburos	---	Media	Despreciable	---	Baja-Media	Despreciable
Limitaciones de espesor del recubrimiento mm (in.)						
Metales ferrosos	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.6 - 2.5 (0.025 - 0.1)	0.5 - 2.5 (0.02 - 0.1)	0.4 - 2.5 (0.015 - 0.1)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.5+)
Metales no ferrosos	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.6 - 2.5 (0.025 - 0.1)	0.5 - 2.5 (0.02 - 0.1)	0.4 - 2.5 (0.015 - 0.1)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.5+)
Aleaciones autofundentes	---	0.4 - 2.5 (0.02 - 0.2)	0.4 - 3.8 (0.015-0.15)	---	---	0.1 - 15+ (0.004 - 0.6+)
Cerámicos	---	0.4 - 0.8 (0.015 - 0.1)	---	---	(0.4 - 5.0 (0.015 - 0.2)	0.05 - 10+ (0.002-0.25+)
Carburos	---	0.4 - 0.8 (0.015 - 0.1)	0.4 - 5.0+ (0.015-0.2+)	---	(0.4 - 5.0 (0.015 - 0.2)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.4+)

* Recubrimiento fundido ⁽¹⁾ HVOF** Recubrimiento no fundido ⁽²⁾ Recubrimientos por cámara, incluye los procesos:
VPS, LPPS, LVPS (Combinación de VPS-LPPS)

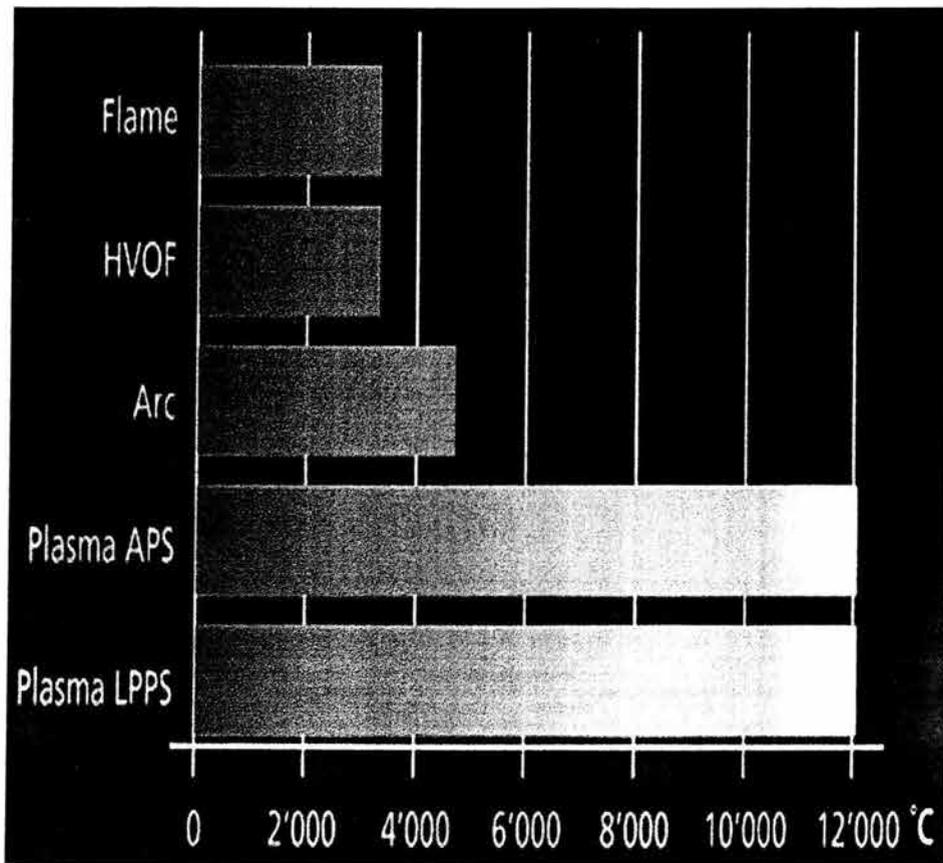


Fig. 3.22. Comparación de los Procesos de Rociado Térmico con respecto a la energía térmica (Temperatura) [III]

3.7 APLICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS.

Entre los muchos beneficios de los **Procesos de Rociado Térmico** podemos nombrar:

- La recuperación y puesta en servicio de partes desgastadas.
- El aumento de la duración en servicio de la pieza recuperada, la que excede al de la pieza original.
- La recuperación de piezas nuevas mal mecanizadas.
- El costo de reparación es menor que el costo de un reemplazo.

A continuación se mencionan algunos ejemplos de soluciones técnicas para la protección de las piezas a trabajar ya sea en la fabricación de piezas originales con recubrimientos incorporados o para la protección de equipos industriales.

1) Resistencia al desgaste adhesivo.

El desgaste adhesivo se presenta cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra, originándose fuerzas adhesivas que arrancan los fragmentos de una superficie que se adhieren a la otra. Este tipo de transferencia metálica a menudo ocurre cuando la lubricación es inadecuada y cuando los materiales son incompatibles.

Si el problema es:

A) Superficies blandas de deslizamiento.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesiten de una superficie:

- De baja rugosidad.
- Que contenga pequeños poros capaces de retener aceite y liberarlo.
- Deformable con el fin de que los descansos puedan alinearse.

Ejemplos:

- Descansos o cojinetes de bronce y de babbit (metal antifricción).
- Camisas de prensas hidráulicas.
- Zapatas de los rodamientos de empuje.
- Cilindros de pistones.
- Cojinetes de compresores.

B) Superficies duras de deslizamiento.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesiten de una superficie con las siguientes características:

- Dura y que tenga alta resistencia al desgaste.
- Reduzca el agrietamiento y el desgaste abrasivo.
- Contenga pequeños poros capaces de retener aceite y liberarlo.
- Que no sólo tenga alta dureza, sino que también sea compatible con otros materiales.

Ejemplos:

- Camisas de desgaste.
- Ejes porta hélice.
- Ejes impulsores de bombas, zona de sellos.
- Ejes y tapas de motores eléctricos.
- Anillos de pistón para máquinas de combustión interna.

2) Resistencia al desgaste por abrasión.

El desgaste por abrasión ocurre cuando partículas extrañas y duras como son arena, sílice, ceniza de carbón etc., en el medio ambiente y los desechos de metal, se adhieren entre las superficies de fricción y desgastan el material de ambas.

Si el problema es:

A) Partículas abrasivas.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que requieran de una superficie con las siguientes características:

- Resistente a la acción de partículas extrañas que rayan las superficies en contacto.
- Con una dureza mayor que la de las partículas abrasivas.

Ejemplos:

- Piezas de la industria petrolera como émbolos de bombas de lodos
- Mezcladores y transportadores sinfín para cemento y concreto
- Ventiladores de extracción.

B) Superficies duras.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que requieran de una superficie con las siguientes características:

- Resistente al desgaste que ocurre cuando una superficie rugosa y dura o una blanda que contenga partículas duras, se deslicen sobre el recubrimiento.
- Superficies lisas para reducir la severidad del desgaste.
- Con coeficiente de fricción adecuado entre la superficie dura y el recubrimiento.
- Resistente al desgaste que se presenta sobre superficies de la maquinaria, cuando fibras e hilos corren a altas velocidades.

Ejemplos:

- Punzones.
- Tornillos de extrusión.
- Sellos de bombas.
- Piezas de textilería como guías de hilos, rollos de estiramiento, etc.
- Rodillos quebradores en la siderurgia.
- Horquillas de cambio de transmisiones de automóvil.

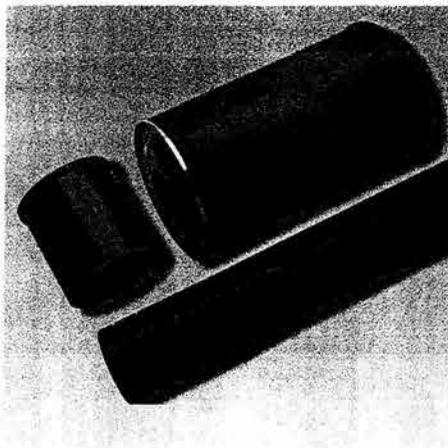


Fig. 3.23. Piezas de textilería como guías de hilos, rollos de estiramiento, etc

3) Resistencia al desgaste por fatiga.

El desgaste de la superficie por fatiga se produce cuando el golpeteo producido por cargas y descargas constantes causan una tensión cíclica, la cual eventualmente forma grietas en la superficie o bajo ella. Con el tiempo se agrieta la superficie causando la pérdida de fragmentos.

Si el problema es:

A) Fatiga superficial causada por movimiento intencional.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que requieran de una superficie con las siguientes características:

- Resistentes al desgaste causado por el deslizamiento o impacto repetido sobre una superficie. (La vibración es una causa común de este tipo de desgaste.)
- Superficies con dureza adecuada para soportar el impacto continuo.

Ejemplos:

- Puntas fijas de esmeriladoras y de tornos.
- Camisas de cilindro.
- Anillos de pistón para motores de combustión interna.
- Válvulas de automóvil.

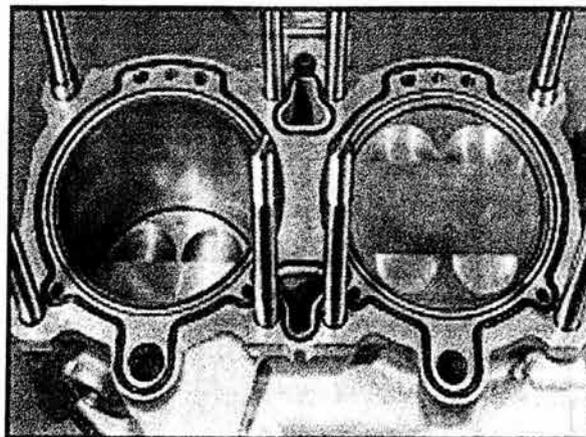


Fig. 3.24. Aplicación de recubrimientos que forman barreras térmicas en motores adiabáticos.

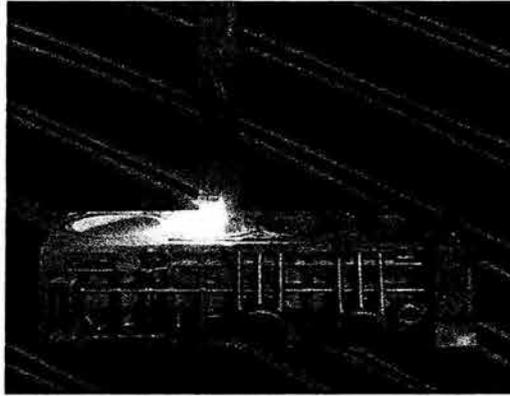


Fig. 3.25 Anillos de pistón para motores de combustión interna.

Proceso de recubrimiento por plasma APS.

Material : fundición de aluminio.

Recubrimiento: molibdeno.

Propiedades del recubrimiento: resistente al desgaste y fricción.

B) Fatiga superficial cuando no existe movimiento intencional.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que requieran de una superficie:

- Que resista el desgaste causado por el deslizamiento oscilatorio de las superficies en contacto. (La vibración es una causa común de este tipo de desgaste.)
- De suficiente dureza para soportar el impacto continuo.

Ejemplos:

- Piezas de motores de reacción incluyendo juntas de expansión, sellos de compresión de aire y estatores, soportes de aspas de ventilador, sellos de aire de turbinas y anillos, sellos y separadores de aire, soportes de las boquillas interiores y paletas.
- Asientos de rodamientos de bola.

C) Cavitación.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesiten una superficie con las siguientes características:

- Resistente al desgaste causado por impacto mecánico inducido por cavitación en flujos líquidos.
- De alta resistencia al desgaste y a la corrosión.
- Que se endurezca como consecuencia del impacto repetitivo de la cavitación.

Ejemplos:

- Impulsores de bombas.
- Anillos de desgaste, asientos e inyectores de válvulas hidráulicas en turbinas de centrales hidroeléctricas.

4) Resistencia al desgaste por erosión.

El desgaste por erosión se presenta cuando partículas que son arrastradas por gases o líquidos golpean a cierta velocidad y ángulo, una superficie.

Si el problema es:

A) La erosión de partículas.

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesiten una superficie con las siguientes características:

- Resistente al desgaste causado por partículas duras y cortantes que impactan la superficie con velocidad. Las partículas pueden ser arrastradas tanto por líquidos como por gases.
- Evite el desgaste abrasivo causado por partículas que golpean la superficie a un ángulo menor que 45° .
- Que sea fuerte pero a la vez lisa para evitar la remoción de material causado por partículas que impactan la superficie a más de 45° .
- Resistente a la corrosión del líquido que transporta las partículas.

Ejemplos:

- Extractores.
- Válvulas hidroeléctricas.
- Colectores de polvo.
- Asientos e inyectores de válvulas de descarga y extractoras.
- Rodetes de turbinas Pelton y Francis.

5) Resistencia al calor y a la oxidación.

Si el problema es:

A) *Mejorar el comportamiento de piezas a altas temperaturas.*

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesitan de superficies con las siguientes características:

- Resistente a la acción del oxígeno desde la atmósfera.
- Que protejan contra atmósferas oxidantes.
- Resistiendo la difusión rápida dentro del sustrato.
- Teniendo un punto de fusión superior a la temperatura de operación.
- Que protejan contra los ambientes gaseosos, corrosivos y erosivos a temperaturas iguales o superiores a los 816 °C (1500 °F).
- Que actúen como una barrera térmica proporcionando aislamiento, que evite que el metal base alcance su temperatura límite.

Ejemplos:

- Cubiertas y crisoles de recocido.
- Silenciadores de escape.
- Cabezas de pistón y vástagos de válvula de escape.
- Boquillas y cámaras de reacción de cohetes.
- Bobinas de inducción para hornos de alta temperatura.
- Instalaciones de tratamientos térmicos y montajes para soldaduras.



Fig.3.26. Cabeza de pistón

Proceso de recubrimiento por plasma APS.

Material : Aleaciones con base de aluminio. Recubrimiento: $ZrO_2+Y_2O_3$

Propiedades del recubrimiento: aislamiento térmico.

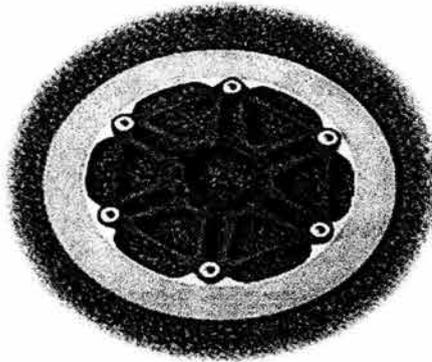


Fig.3.27. Discos de frenos.

Discos convencionales muy pesados (fundición gris)
Nuevos discos de aluminio recubiertos con carburos los cuales reducen el 0.61 Kg de peso (más de 50 %) y en consecuencia el consumo de combustible.

B) SOPORTEN LA ACCIÓN DE METALES LÍQUIDOS

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesitan de superficies con las siguientes características:

- Recubrimientos que sean impermeables a los metales líquidos en aquellas piezas que necesiten una superficie.
- Que proteja el material base contra los efectos del cobre, acero, aluminio y del zinc fundidos.

Ejemplos:

- Tanques galvanizadores.
- Toberas para manejar tanto aluminio como acero líquidos.
- Moldes de colada continua y moldes de fundición utilizados para manejar cobre líquido.

6) Resistencia del Acero contra la Corrosión Marina o Atmosférica

Si el problema es:

A) *La corrosión atmosférica.*

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesitan de superficies con las siguientes características:

- Que resista ambientes que se encuentren cerca de grandes ciudades y alrededor de plantas industriales donde existan humo y vapores químicos.
- Que resista ambientes que se encuentren cerca de la costa donde la atmósfera está cargada de sal y humedad. Este tipo de exposición incluye salpicaduras directas de agua salada.
- Que resista ambientes que se encuentren normalmente tierra adentro y que contengan un porcentaje mas bajo de contaminantes.

Ejemplos:

- Tubos para paso de cables eléctricos.
- Puentes.
- Componentes de línea de transmisión.
- Muebles para jardín y terraza.
- "Árboles de Navidad" de pozos petrolíferos.
- Superestructuras de barcos.
- Caja de transformadores.
- Intercambiadores de calor.
- Equipos de limpieza al vapor.
- Exteriores de los tanques de almacenamiento de agua.

B) *La corrosión marina y por inmersión.*

La solución es utilizar:

En aquellas piezas que necesitan de superficies con las siguientes características:

- Resistentes a la corrosión causada por agua dulce.
- Resistente a la corrosión de agua dulce no potable, donde las temperaturas alcancen la del vapor a 204 °C (400 °F) y el pH esté entre 5 y 10.
- Resistente a la corrosión por inmersión total o parcial en agua salada.
- Resistente a la corrosión provocada por el manejo de productos químicos como los aceites, los combustibles y los solventes.

Ejemplos:

- Toberas para manejar tanto aluminio como acero líquidos.
- Moldes de colada continua y moldes de fundición utilizados para manejar cobre líquido.

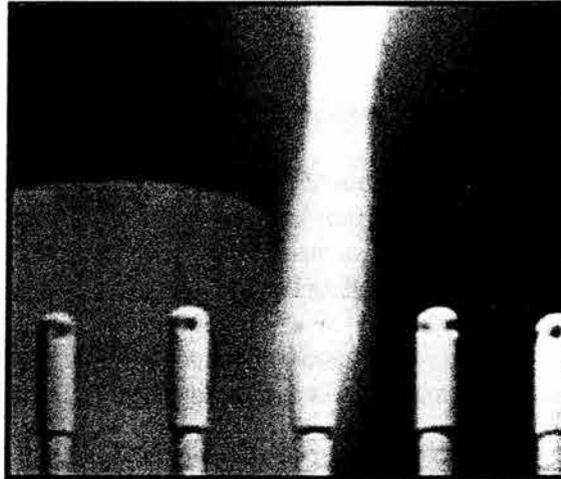


Fig.3.28. Válvulas de vapor.

Recubrimiento a las válvulas de un barco de la US Navy
Después de 4 años, las metalografías no indicaron cambios estructurales o
desprendimiento del recubrimiento.

3.8 EJEMPLOS DE LA APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO EN DIVERSAS INDUSTRIAS.

Las diversas aplicaciones de rociado térmico crecen constantemente. La gran preparación de ingenieros y el desarrollo de muchas técnicas de rociado térmico, son los más importantes factores de este crecimiento. Por obvias razones no es posible cubrir todas las aplicaciones de la tecnología de rociado térmico. La selección fue tomada respecto a la importancia de aplicación de la industria.

En la solución particular de un problema se puede tener el siguiente modelo:

- Identificación del problema (desgaste, abrasión, etc.)
- Especificación de las propiedades del recubrimiento.
- Proponer soluciones, polvos para el rociado térmico, técnica de rociado térmico y tratamiento previo al rociado térmico.
- Evaluación de los resultados de la técnica de rociado térmico y, si los datos son utilizados, desde un punto de vista económico.

Medicina:

La principal aplicación del rociado térmico en la medicina son las prótesis (ortopedia). Las prótesis son construidas de materiales bioinertes tales como acero inoxidable, aleaciones de CoCrMo o TiAlV.

Los recubrimientos usados para estos propósitos deben de cumplir los siguientes requerimientos:

- Porosidad (20-40%)
- Biocompatibilidad y estabilidad en el cuerpo.
- Buena adhesión para la prótesis.
- El recubrimiento no tiene que ser rechazado después del crecimiento del hueso.

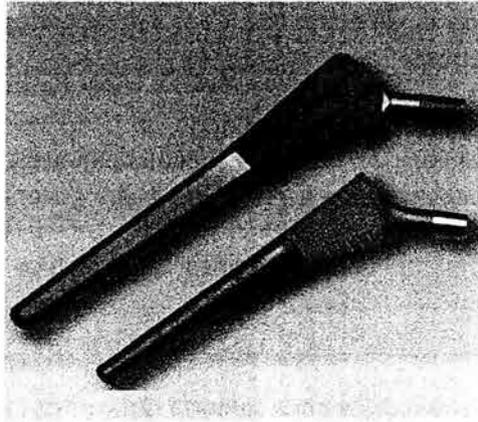


Fig.3.29 Rociado térmicamente por la técnica VPS, es un bioactivo material cerámico que acelera el crecimiento del hueso sobre la superficie del implante creando una rápida y firme unión.

Industria química:

Las herramientas son usadas en la minería del petróleo, las posibles fallas se deben a la abrasión, erosión y corrosión. Cuando el diseño de la herramienta llega a su límite de vida, es necesario recubrir las superficies para mejorar las propiedades, por ejemplo:

- Taladro cónico para barrenar: Con el uso de polvos (WC-15 wt.%Co) y rociado térmicamente por la técnica de la super-detonación.
- Rotores: Con el uso de polvos de composición (en wt%) bal. W, 20Cr, 7Ni, 6C y rociado térmicamente por la técnica de la super-detonación.

Tanques en la refinería química:

Los tanques de la refinería son construidos de acero con 0.5Mo con un diámetro de 3m y 12m de largo, la pared del tanque fue diseñada con un espesor de 127mm, basado sobre la corrosión. Debido a la alta temperatura de azufre y amoníaco, la corrosión fue más severa y el tanque comenzó a corroerse rápidamente. En lugar de reemplazar todo el casco (costo aproximado de 600,000 dólares), se usó acero inoxidable 316L como recubrimiento con un espesor de 760µm, usando la técnica HVOF. El costo de la operación incluyendo la automatización del proceso fue de (120,000 dólares) y el recubrimiento tiene una buena protección por un periodo de 2 años contra la corrosión.

Construcción de máquinas industriales:

El potencial del rociado térmico en la construcción de máquinas industriales (textil, agroalimentaria, construcción de bombas, etc.) fue reconocido desde hace tiempo y muchas de las partes substituidas.

Como por ejemplo: En las bombas agroalimentarias, en la aplicación de transportación de líquidos (en la producción de yogurt, chocolate, etc.) en las máquinas agroalimentarias ocurre deslizamiento y rotación de los pistones fácilmente y hay desgaste abrasivo (debido a las partículas en el líquido), La superficie de los pistones es protegida con un recubrimiento cerámico aplicando la técnica APS.

Minería industrial:

Apuntaladores hidráulicos: Son usados en la minería del carbón y están sometidos a la acción agresiva del agua. El recubrimiento depositado sobre la parte interna de los apuntaladores, tiene las siguientes características:

- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia al desgaste.

Para el propósito se utilizó la técnica APS con una particular composición de polvos y 400µm. de espesor.

Ingeniería civil:

Puentes de concreto y de acero, especialmente en las costas, son sujetas a la humedad, sal, químicos en la atmósfera, etc. Usando la técnica AS en la protección del acero con zinc y aluminio, es una aplicación que consigue protección por muchos años.

Sin embargo la tecnología de rociado térmico está en competencia con la pintura. En los puentes de USA son de gran importancia. Entre los puentes rociados térmicamente se encuentra el puente Rombak en Norway, el Pierre Laport (Canadá), etc.

Aeronáutica e industrias espaciales:

Hoy las aplicaciones en los turbo reactores representan gran parte del mercado de rociado térmico (30-40%) del total. El rociado térmico es aplicado en partes de los turbo reactores tales como ventiladores del compresor, alabes de las turbinas, etc. Los recubrimientos tienen que soportar temperaturas de 850 K aproximadamente. Con WC - Co y usando la técnica de rociado térmico por detonación, HVOF, APS, pueden ser utilizados para los ventiladores del compresor.

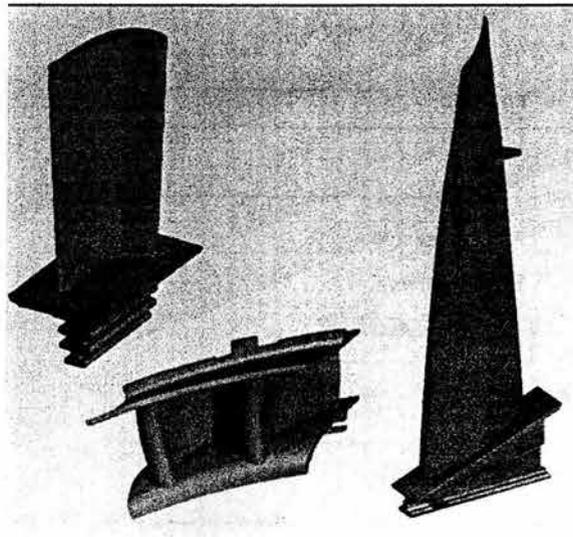


Fig.3.30 Alabes y aspas.

Proceso de recubrimiento: (APS, VPS)

Material : aleación inconel 738, 939

Recubrimiento: CoNiCrAlY, ZrO₂ +Y₂O₃

Requerimientos del recubrimiento: Resistencia al calor de los gases, aislamiento térmico.

RECOMENDACIONES IMPORTANTES PARA EL MAQUINADO

El rociado térmico no es recomendable en piezas con ángulos agudos, esto es debido a la alta concentración de esfuerzos térmicos.

Algunas indicaciones importantes para el maquinado posterior al proceso de recubrimiento se observan en la figura. 3.31

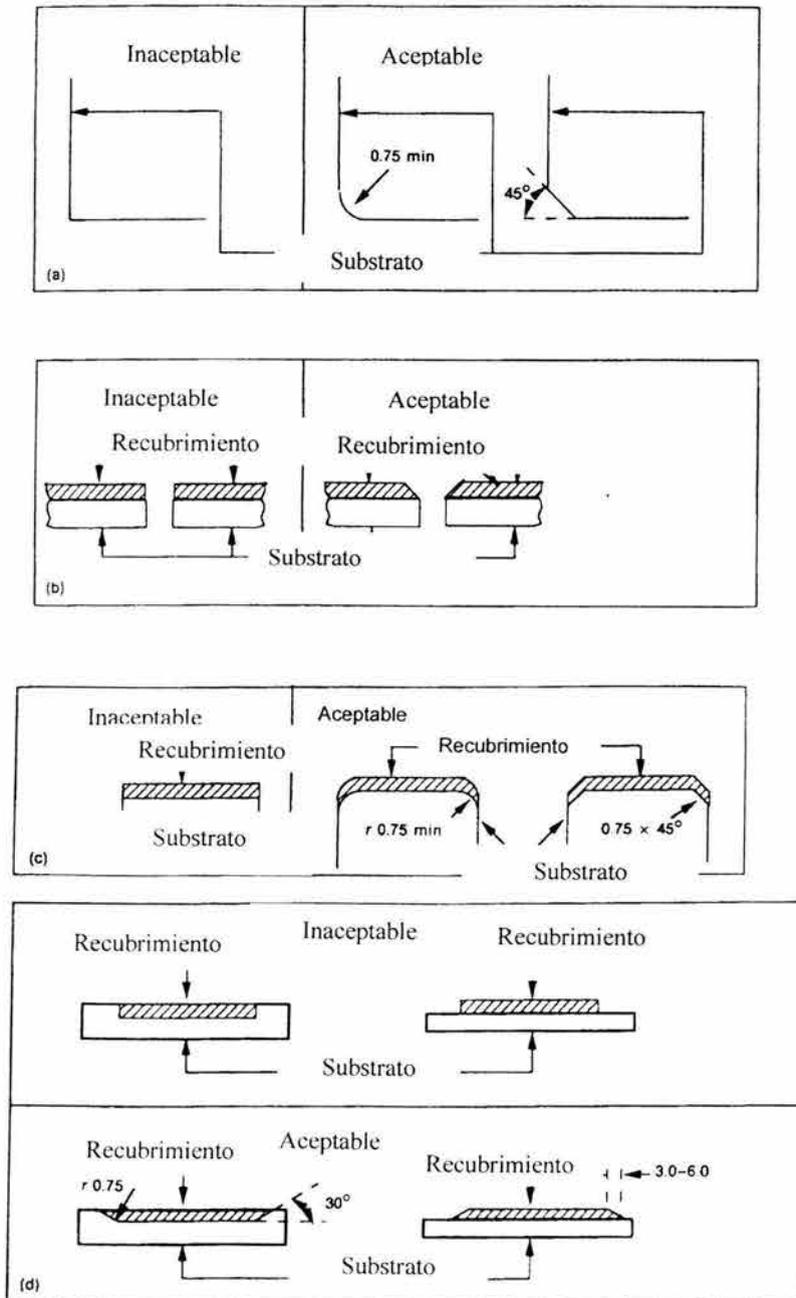


Fig.3.31 Ejemplos de correctas e incorrectas geometrías de superficies rociadas térmicamente.

CAPITULO 4

SELECCIÓN DE MATERIALES (SUBSTRATO Y POLVO)

4.1 SUBSTRATO.

Se cuenta con un molde de inyección de plásticos elaborado con un acero de bajo contenido de carbono (1018) el cual esta destinado a la producción de clips. A este molde se le modificaran algunos aspectos para adaptarlo a nuestras necesidades y realizar el trabajo de investigación.

4.1.1. PROCEDIMIENTO REALIZADO PARA EL REMAQUINADO DEL MOLDE.

- Lo que se realizó en dicho molde fue tapar los barrenos de los botadores ya que eran de diámetro mayor a comparación del diámetro de los botadores con los que se cuenta en el laboratorio y poder reutilizarlos.
- Se reubicaron las posiciones de los barrenos de tal manera que no interfirieran con los insertos colocados. Esto se realizó utilizando el paquete de Mastercam para que de una manera más precisa se obtuvieran dichas posiciones y posteriormente maquinarlos en el centro de maquinado VMC300, que se encuentra en el laboratorio de manufactura avanzada de la Facultad de Ingeniería (Fig. 4.1).

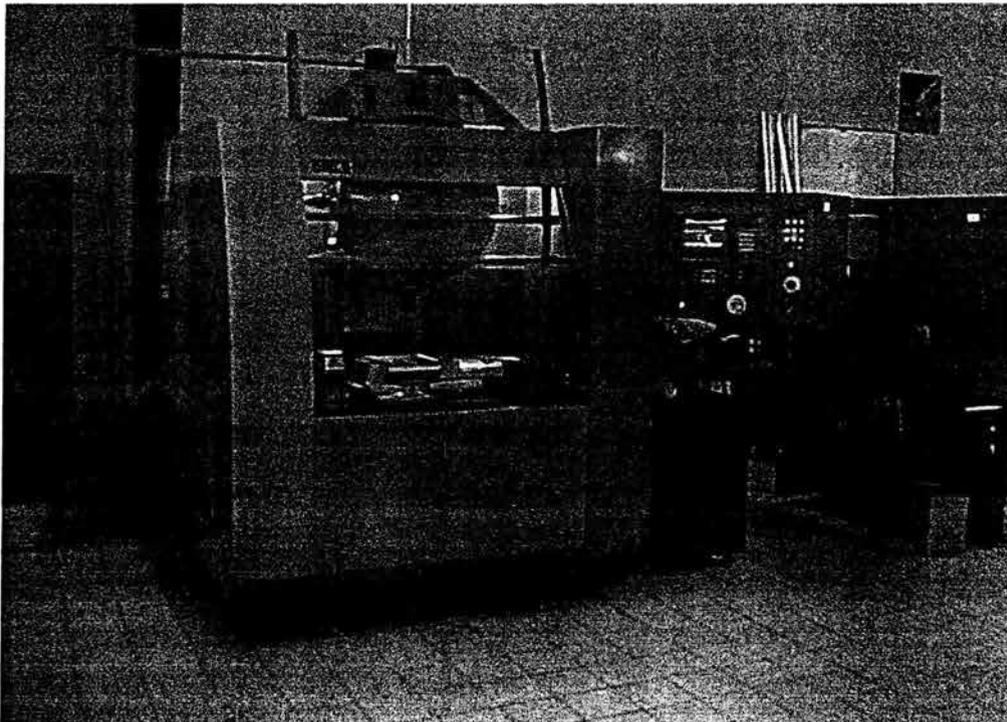


Fig. 4.1 Centro de maquinado VMC300

Características de la máquina VMC300:

Centro de Maquinado CNC.
Campo de trabajo (420 x 380 x 400) mm
Motor A.C. 15 H.P.
5000 RPM
Control Sinumerik 8104.3D

- Para llevar a cabo el maquinado de los barrenos en la placa del molde, se utilizó la mesa de coordenadas del Centro de Instrumentos de la UNAM ya que se necesitaba la posición exacta de dichos barrenos; para posteriormente maquinar dichas posiciones en la placa de botadores, en la placa de enfriamiento y tapa de enfriamiento.
- Se elaboró una escuadra con el objetivo de adaptarla a la prensa de la máquina VMC 300 y tener el molde en una misma posición por si se requiere remaquinar el molde en sus cavidades después del rociado térmico. (Fig. 4.2)

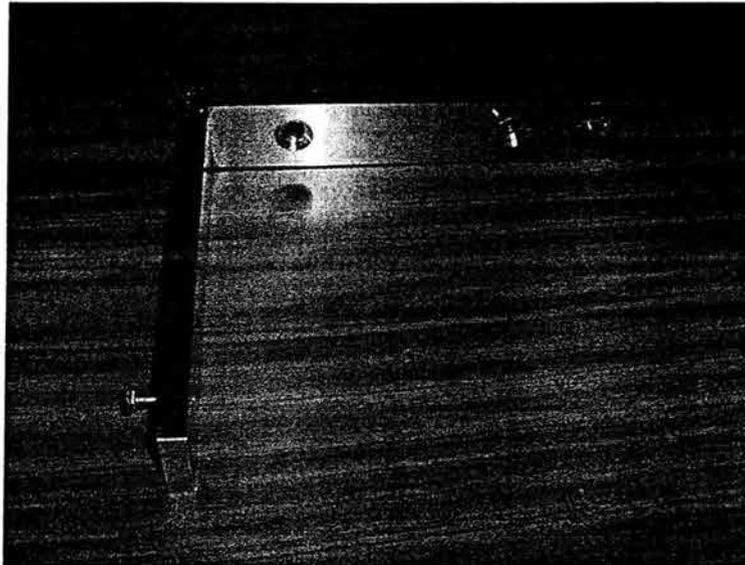


Fig. 4.2 Escuadra.

- El remaquinado de las cavidades del molde (Clips) se realiza utilizando el paquete de Mastercam y el centro de maquinado (VMC 300), debido a que la geometría anterior es muy complicada para los fines de este trabajo (recubrimiento del molde) y se decide maquinar otra geometría (llaveros) como producto terminado. tomando como base el molde ya existente. (Fig. 4.3, Fig. 4.4).



Fig. 4.3 Maquinado del molde.

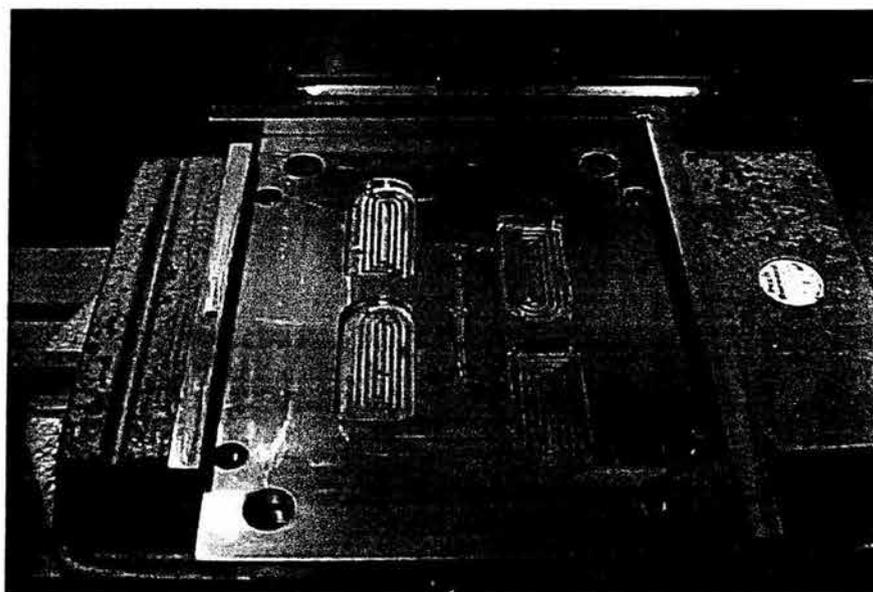


Fig. 4.4 Molde terminado.

4.2 POLVO (RECUBRIMIENTO).

El recubrimiento debe cumplir ciertas propiedades, que se requieren en un molde de inyección de plástico como: coeficiente de fricción bajo, resistencia al desgaste, alta dureza, maquinabilidad, etc.

Existen en el mercado diferentes polvos para aplicar el recubrimiento, pero dependerá del equipo de rociado térmico, del costo del polvo, etc. Suelzer Metco recomienda el polvo 12C para fines de este trabajo debido a sus propiedades las cuales se mencionarán a continuación.

Recubrimiento 12C (Níquel- Cromo- Boro)

El polvo 12C es una aleación autofundente, del cual se obtiene un excelente maquinado del recubrimiento.

El polvo 12C es aplicado a materiales base como acero, hierro ó níquel donde es menos probable su desprendimiento.

La dureza del recubrimiento 12C se encuentra en el rango de Rc 30-35; Recomendado para la resistencia al desgaste por partículas abrasivas, cavitación y erosión, ambos a bajas y altas temperaturas (1550°F), etc.

Metco 12C es una aleación autofundente Níquel-Cromo-Boro, el cual fue diseñado para ser fundido después del rociado térmico en una atmósfera normal (unión entre partículas, libre de porosidad).

APLICACIONES.

FUNCIÓN DEL RECUBRIMIENTO	APLICACIÓN
Resistencia a superficies duras	matriz de extrusión
Resistencia a superficies duras a altas temperaturas	formación en caliente por medio de matriz
Resistencia a la cavitación	bombas

CARACTERÍSTICAS DEL POLVO

TÍPICA COMPOSICIÓN:

Cromo 10 %, Boro 2.5%, Hierro 2.5%, Silicio 2.5%, Carbono 0.15%, Níquel balance.

Punto de fusión: 1010-1065°C (1850-1950°F)

Tamaño de las partículas: -125 +45 μm (-120 +325 malla).

Tabla 4.1 Propiedades físicas del recubrimiento 12C

PROPIEDADES FÍSICAS DEL RECUBRIMIENTO	RECUBRIMIENTO 12C
Textura	Media
Maquinado	Excelente
Rectificado	Excelente
Macro dureza, fundido	Rc 30-35
Ductibilidad	Menor al 1%
Rango de plasticidad	Media
Contracción	20%
Porosidad	Esencialmente libre de porosidad
Coefficiente de fricción	Bajo
Resistencia a la corrosión	Similar al acero inoxidable
Propiedades de adherencia en el rociado térmico	Excelente
Tipo de unión	Metalúrgica

LIMITACIONES DEL ESPESOR

Metco 12C recomienda un rango de 1.2-1.7 mm (0.050"- 0.070")

FUSIÓN

Utilizando la pistola 5P-II como soplete, reducir la flama a un flujo de 3 de oxígeno por 4 de acetileno.

No calentar en una pequeña área del recubrimiento a una temperatura alta. El recubrimiento podría derretirse rápidamente y separarse de la base. Pre calentamiento, mover el soplete a una distancia de 4 a 5 pulgadas, moviendo la flama sobre la superficie a una temperatura de 315-540 °C

Después del pre calentamiento, mover el soplete a una distancia de 1 ½" de la pieza de trabajo, aproximadamente a una pulgada del borde del recubrimiento oscilando el soplete hasta alcanzar el rojo vivo, el recubrimiento podría mostrarse brillante cuando se funde, no sobre pasar este estado puesto que el recubrimiento no podría adherirse.

Cuando la fusión se termina, dejar enfriar lentamente. Un rápido enfriamiento el recubrimiento podría separarse.

La fusión podría hacerse por medio de inducción o por un horno eléctrico.

MAQUINADO

Metco 12C puede ser maquinado con herramientas de carburo.

CAPITULO 5

EXPERIMENTACIÓN.

Se realizaron algunas pruebas experimentales con probetas para poder determinar las condiciones idóneas del granallado y del rociado térmico, para posteriormente aplicarlo al molde de inyección de plásticos.

5.1 GRANALLADO DE PROBETAS.

5.1.1 MATERIAL Y EQUIPO UTILIZADO PARA EL GRANALLADO DE LAS PROBETAS:

- Probetas de acero 1018 aproximadamente de 5x4 centímetros.

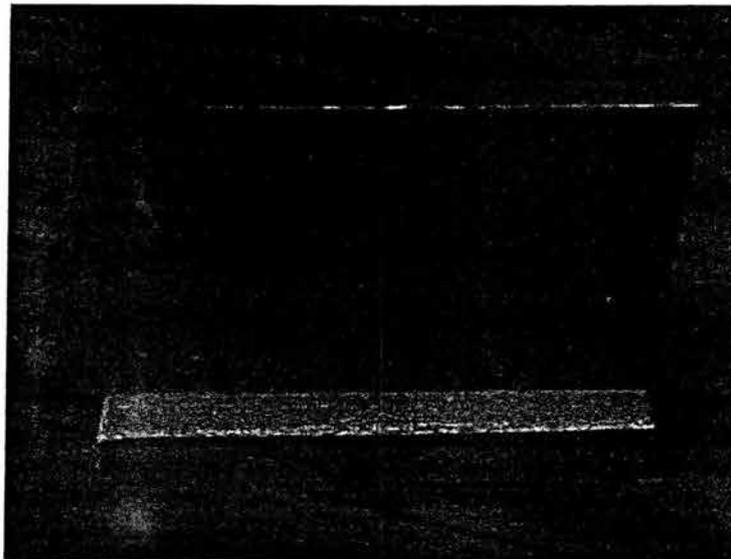


Fig. 5.1 Probetas de acero 1018.

- Granalla de óxido de aluminio.



Fig. 5.2 Partículas de óxido de aluminio.

- Granalladora de succión.



Fig. 5.3 Equipo para granallar.

- Compresor de aire con capacidad 175psi

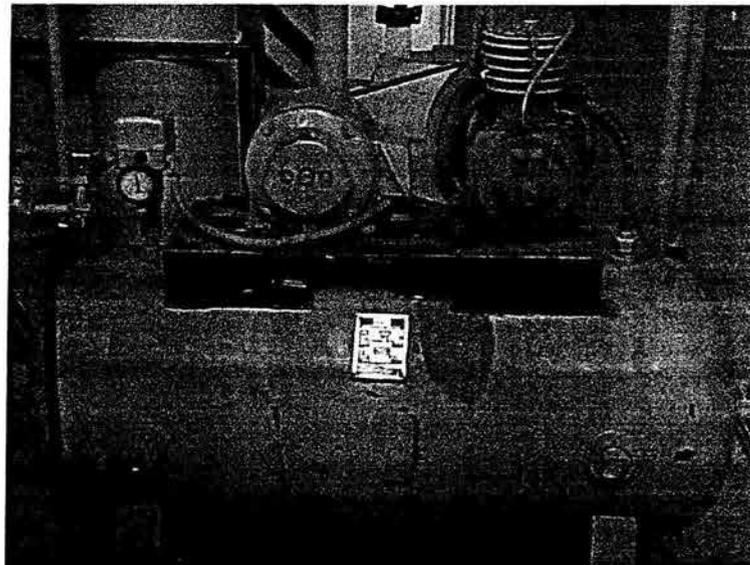


Fig. 5.4. Compresor usado en el proceso de granallado.

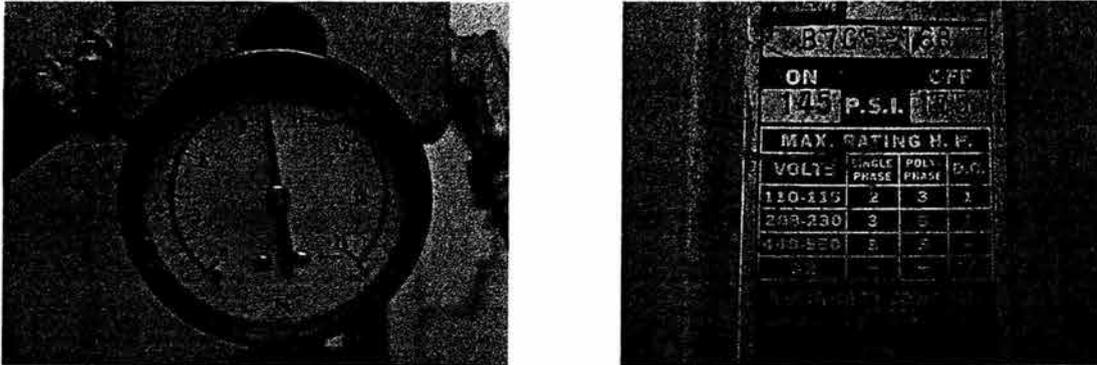


Fig. 5.5. Rangos de presión del compresor.

- Deposito recolector de granalla.
- Acetona y desengrasante (Tricloroetileno) como agente limpiador.
- Goggles
- Guantes

5.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN EL GRANALLADO:

Granallado: Consiste en proyectar un abrasivo (óxido de aluminio) a cierta presión, hacia la pieza de trabajo a fin de generar limpieza y rugosidad en la pieza de trabajo para que posteriormente se pueda adherir el recubrimiento a través de la proyección térmica por flama (Fig. 5.6)

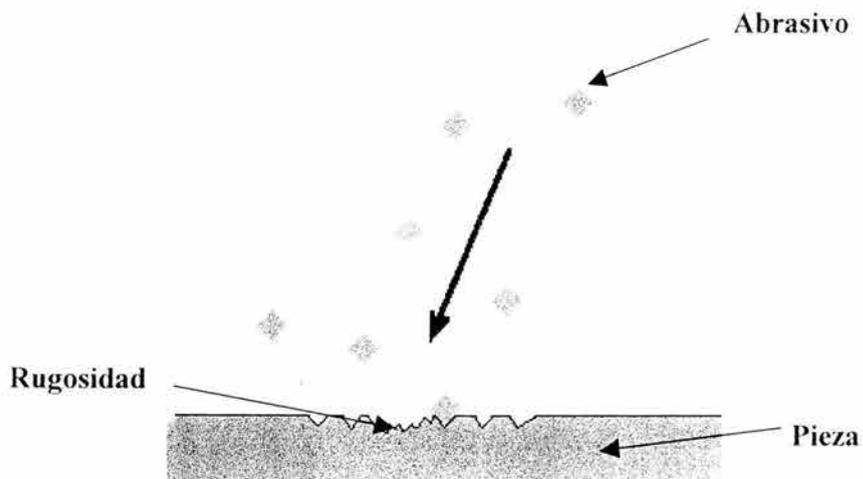


Fig. 5.6 Diagrama esquemático de la proyección de un abrasivo hacia la pieza de trabajo.

Se granallaron 4 probetas de acero 1018 de (5x4cm) con el abrasivo (óxido de aluminio) a una presión de 9-11 Bars y una distancia de proyección de 5 –10 cm, con un tiempo aproximado de 20 minutos por cada una (Fig. 5.7) obteniendo las siguientes lecturas tomadas en el rugosímetro:

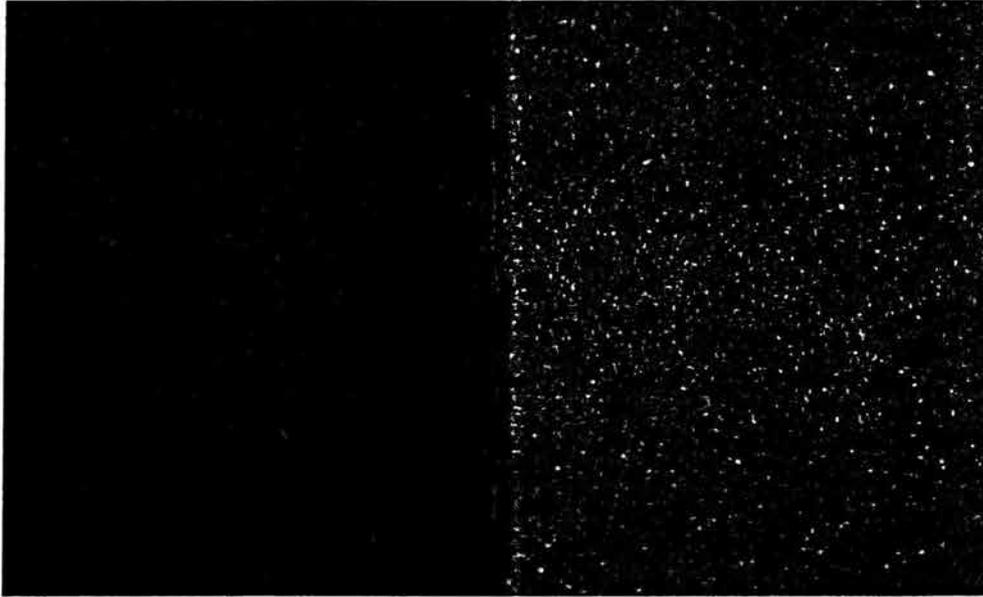


Fig. 5.7 Probeta sin granallar.

Probeta granallada.

Lecturas de rugosidad:

Probeta # 1	Probeta # 2	Probeta # 3	Probeta # 4
Ra: 10.2 μm	Ra: 9.7 μm	Ra: 10.7 μm	Ra: 10.5 μm

El granallado debe de ser homogéneo, ya que si existe una inadecuada preparación de la pieza de trabajo, el recubrimiento podría no adherirse. (Fig. 5.8)



Fig. 5.8 Granallado no homogéneo.

5.2 ROCIADO TÉRMICO DE LAS PROBETAS.

Una vez granalladas las piezas y tomadas las lecturas de rugosidad, se procedió a rociar térmicamente las probetas de acero 1018 por medio del equipo de proyección térmica por combustión de polvos, el cual se muestra en la figura 5.9

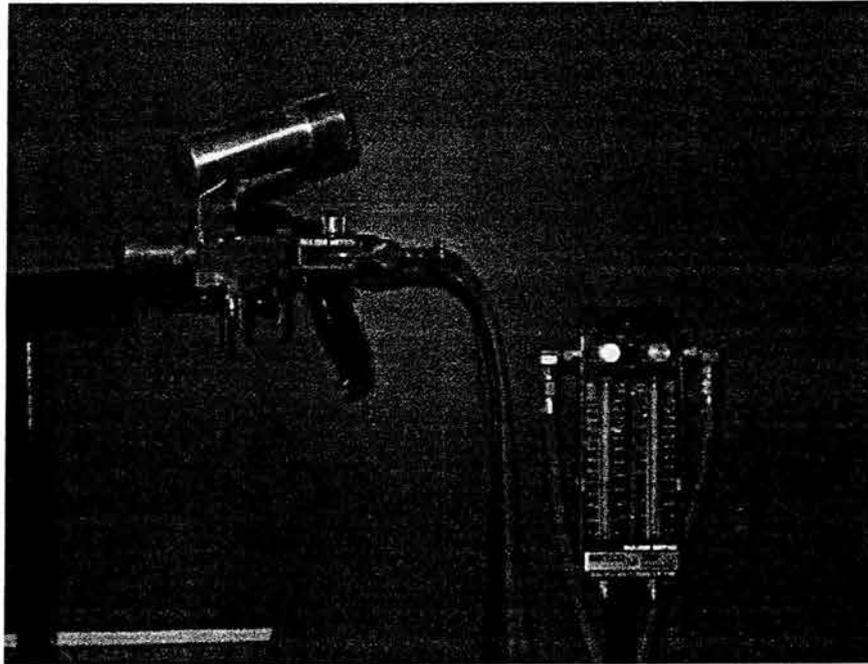


Fig. 5.9 Pistola de rociado térmico por flama de polvos 5P-II.

5.2.1 EQUIPO UTILIZADO:

Pistola de proyección térmica 5P-II.

Polvo 12C.

Tanques de Oxiacetileno.

Accesorios de la pistola de proyección.

Probetas granalladas.

Tricloroetileno (Desengrasante).

Tabla 5.1 Parámetros de rociado propuestos por el proveedor Metco.

Metco polvo	12C
Vibrador	No
Boquilla	P7B-G
Válvula	11
Presión del Oxígeno	20 psi
Presión del Acetileno	13 psi
Flujo del Oxígeno	34 psi
Flujo de Acetileno	34 psi
Alimentación del polvo	16 - 18
Distancia de proyección	7in – 10in (177.8 mm – 254 mm)

5.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN EL ROCIADO TÉRMICO.

Antes del rociado térmico se limpian las probetas con el desengrasante (Tricloroetileno). Posteriormente se rocían térmicamente las probetas con diferentes tiempos de aplicación (Fig. 5.10) para obtener distintos rangos de espesor y tomar una decisión de acuerdo a las características de espesor del polvo 12C Metco (Níquel-Cromo-Boro). Después del rociado térmico se autofunde el recubrimiento con la pistola 5P – II, hasta alcanzar su punto de fusión (ver capítulo 4) con un tiempo aproximado de 10 minutos por cada probeta (Fig. 5.11).

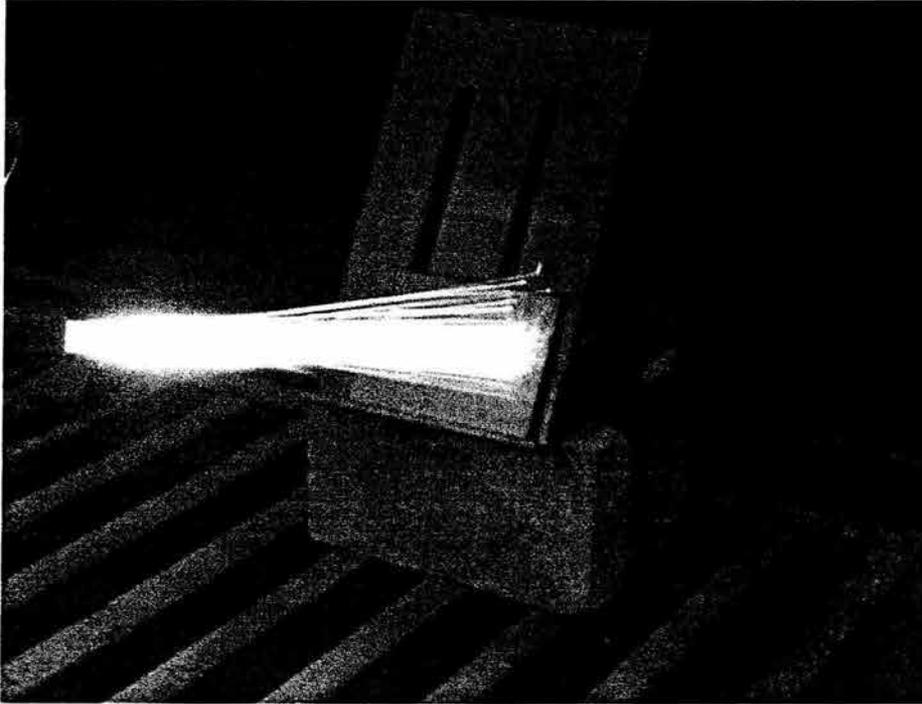


Fig. 5.10 Rociado térmico.

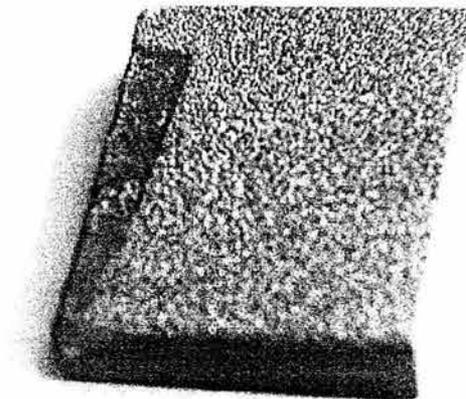


Fig. 5.11 Probeta rociada térmicamente (Recubrimiento).

Se cortan las probetas rociadas térmicamente en diferentes secciones para ser montadas en baquelita (Fig. 5.12, Fig. 5.13) para realizarles metalografía y poder así observarlas en el microscopio óptico para medir espesores, tomar micro dureza Vickers en el recubrimiento y material base (Fig. 5.14), obteniendo los siguientes resultados (ver tabla 5.2, tabla 5.3, Fig. 5.19 y Fig. 5.20).

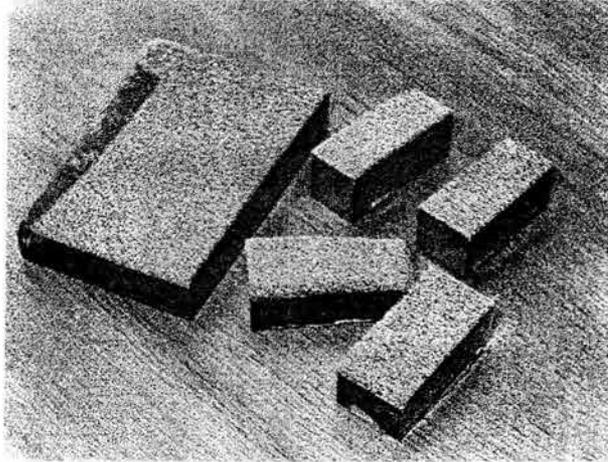


Fig. 5.12 Corte de probeta.

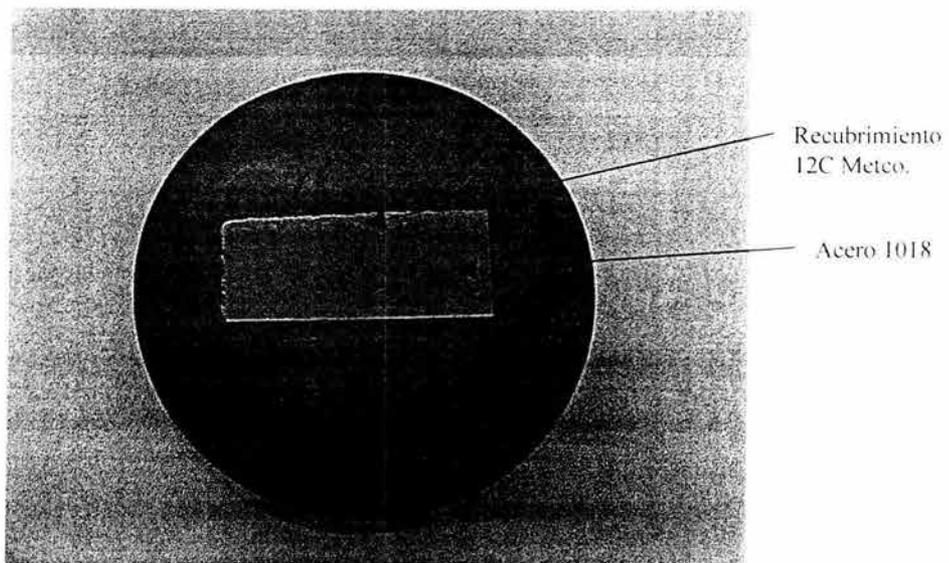


Fig. 5.13 Probeta montada en baquelita.

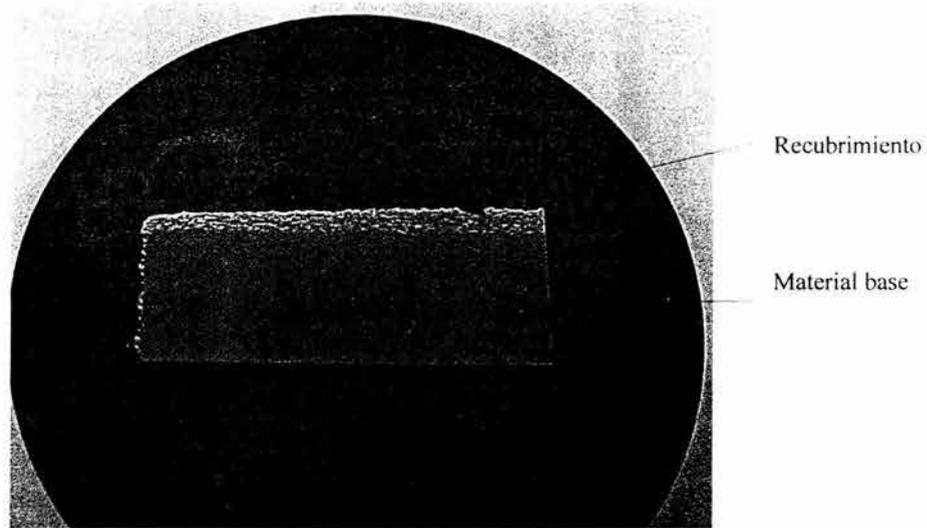


Fig. 5.14 Recubrimiento y material base.

- Las probetas de experimentación fueron observadas en el microscopio electrónico de barrido (Modelo LX20, Philips equipado con EDS para análisis químico por espectroscopia de R-X característicos) para observar su microestructura, interfase metal base-recubrimiento, porosidad y espesores alcanzados, como se observa en las siguientes figuras:

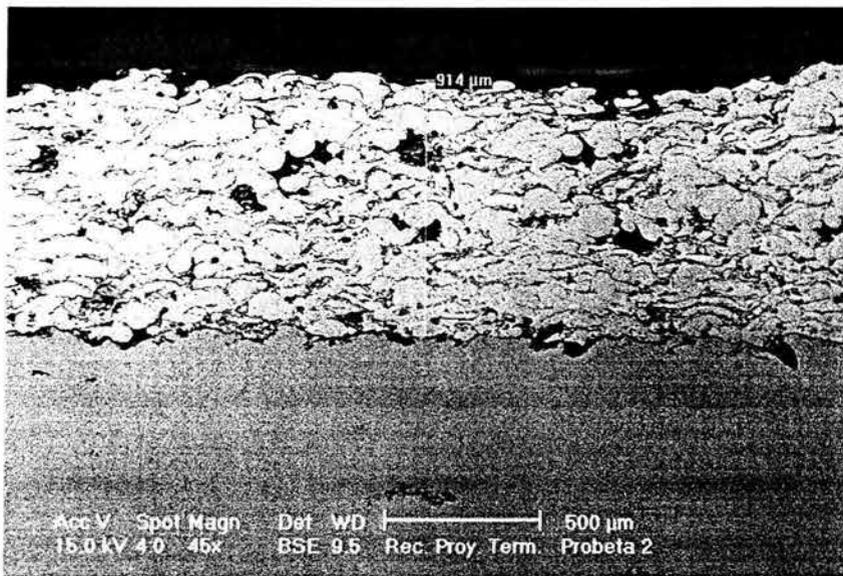


Fig. 5.15 Probeta 2 (8 minutos de rociado térmico, espesor alcanzado de 1 mm a 1.20 mm, 8 minutos de autofundente)

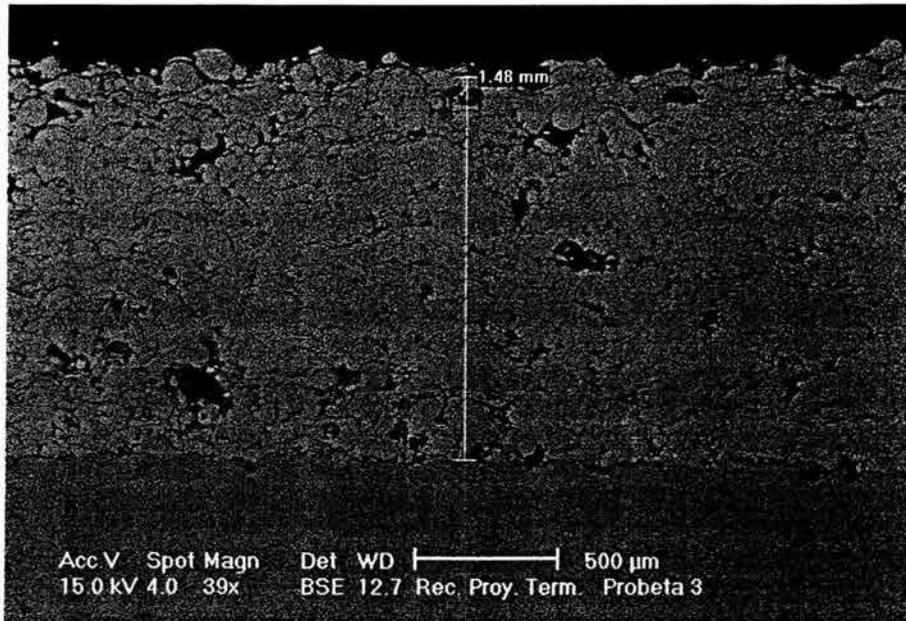


Fig. 5.16 Probeta 3 (Rociado térmico 10 minutos, espesor alcanzado de 1.55mm a 1.72mm, 10 minutos de autofundente)

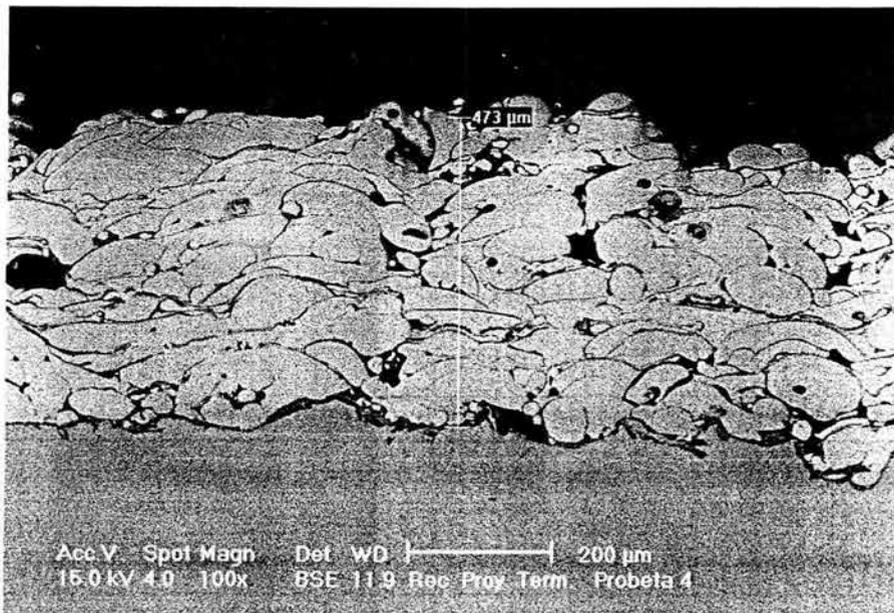


Fig. 5.17 Probeta 4 (Rociado térmico 7 minutos, espesor alcanzado de 0.65mm a 0.70mm, 9 minutos de autofundente)

En las anteriores figuras se observa que cuando se aplica el proceso de autofundente la interfase metal base – recubrimiento es continua, lo cual parece mostrar una mejora en la adherencia, caso contrario sin el proceso de autofundente se observan puntos donde la unión con el material base no es buena y la porosidad entre las partículas del recubrimiento es más evidente, aunado a que el granallado de la pieza no es uniforme (Fig. 5.18).

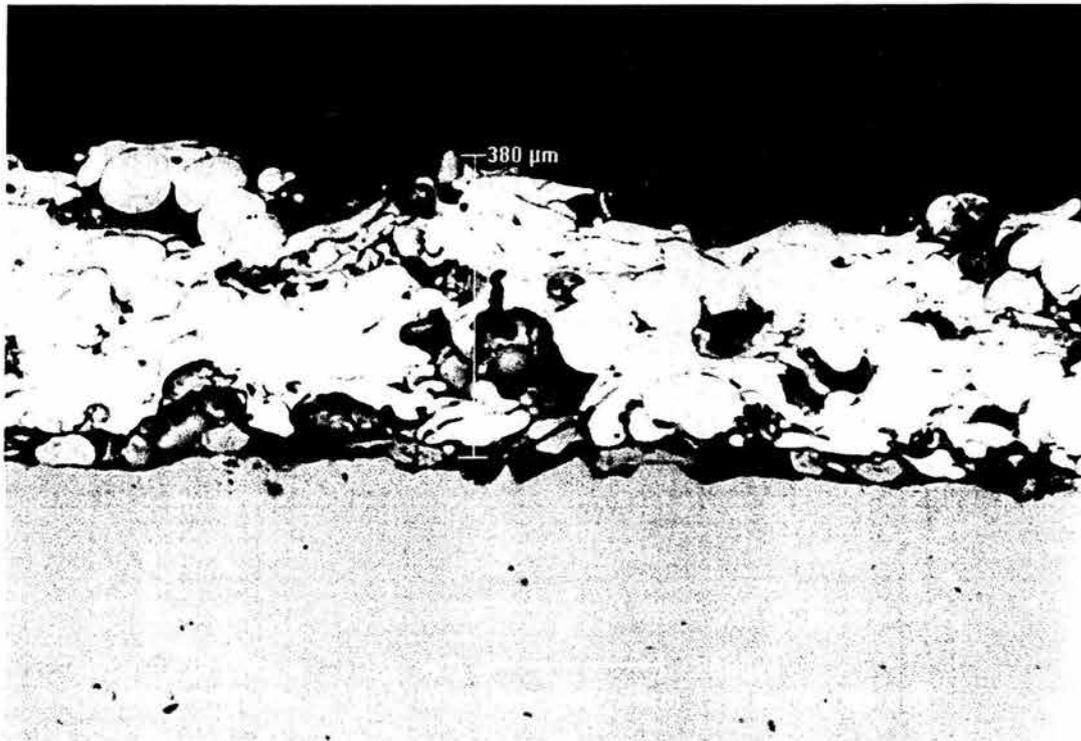


Fig. 5.18 Probeta sin el proceso de autofundición.

5.2.3 RESULTADOS DE DUREZA Y ESPESORES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN.

En la tabla 5.2 se muestran resultados de microdureza Vickers obtenidas en las probetas:

Tabla 5.2 Valores de dureza en las diferentes probetas.

Probeta	Dureza Vickers Material base (1018) Cerca de la unión	Dureza Vickers Recubrimiento Cerca de la unión	Dureza Vickers Material base (1018) Lejos de la unión	Dureza Vickers Recubrimiento Lejos de la unión
1	D =188 D =185 D =186 D =144 D =174 Promedio D =175.5	D = 310 D =623 D = 549 Promedio D =494	D =232 D =232 D =232 D =232 Promedio D =232	
	D = 153 D =150 D =161 D =151 D =154 Promedio D =153.8	D =566 D =299 D =509 D =441 D =644 Promedio D =491	D =193 D =157 D =177 D =150 D =172 Promedio D =169.8	D =532 D =715 D =514 D =707 Promedio D =617
2	D =161 D =168 D =161 Promedio D =163.3	D = 310 D =232 Promedio D =271	D =161 D =168 D =161 Promedio D =163.3	D =701 D =739 D =644 Promedio D =694.6
	D = 168 D =169 D =175 D =166 D =174 Promedio D =170.4	D =603 D =391 D =349 D =501 D =509 Promedio D =470	D =154	D =386 D =441 D =286 D =232 D =362 Promedio D =341.4
3	D = 161 D = 178 D =148 D =169 Promedio D =164	D =655 D =543 D =633 D =516 Promedio D =586	D =183 D =177 D =175 D =175 Promedio D =177.5	D =644 D =460 D =593 Promedio D =565.6
	D =143 D =175 D =210 D =161 D =169 Promedio D =171.6	D =321 D =752 D =473 D =466 Promedio D =503	D =195 D =172 D =168 D =199 D =154 Promedio D =177.6	D =752 D =466 D =453 D =593 Promedio D =566
4	D =150 D =133 D =143 D =138 Promedio D =141	D =466 D =412 D =480 D =447 Promedio D =451.25	D =148 D =157 D =148 D =154 Promedio D =151.75	D =487 D =441 D =306 Promedio D =411.3
	D =136 D =116 D =125 D =137 Promedio D =128.5	D =613 D =473 D =310 D =540 Promedio D =484	D =185 D =157 D =162 D =157 Promedio D =165.25	D =345 D =453 D =473 D =381 Promedio D =413

A continuación en la figura 5.19, podemos observar gráficamente que los valores de dureza obtenidos anteriormente, se logran triplicar en el recubrimiento respecto al material base. (Nota: La dureza del acero 1018 sin aplicarle algún tipo de tratamiento es de 96Rb = 210HV)

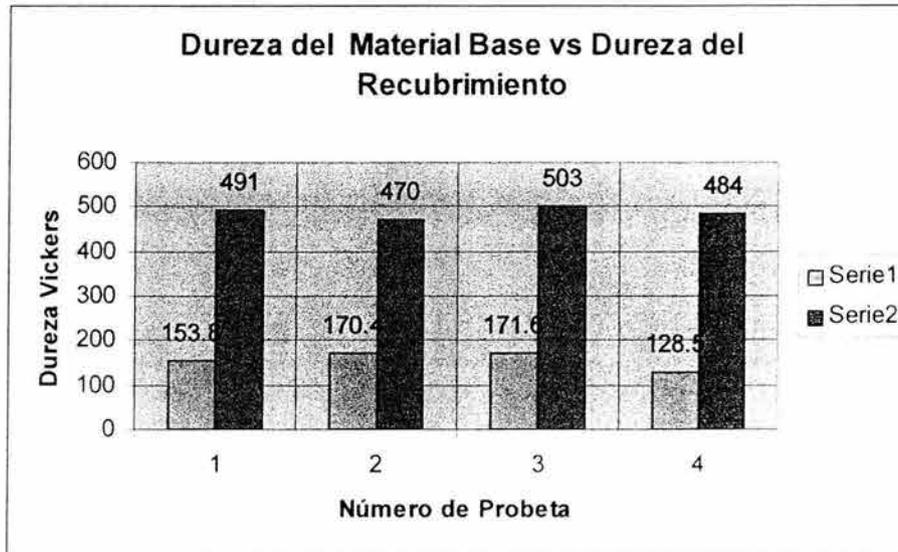


Fig. 5.19 Variación de dureza del material base y el recubrimiento.
Serie 1 Material Base.
Serie 2 Recubrimiento (12 C Metco)

Los resultados de espesor en las probetas fueron los siguientes:

Tabla 5.3 Variación del espesor del rociado térmico respecto al tiempo.

Probeta	Rociado térmico	Espesor aproximados con el microscopio óptico.
1	5 minutos	0.55mm-0.75mm
4	7 minutos	0.65mm-0.70mm
2	8 minutos	1.00mm-1.20mm
3	10 minutos	1.55mm-1.72mm

Gráficamente podemos observar que conforme aumentemos el tiempo de exposición del rociado térmico los espesores aumentan proporcionalmente en un área de 20 cm^2 ver la figura 5.20. *Nota:* No sobrepasar los límites de espesor ya que el material se puede desprender.

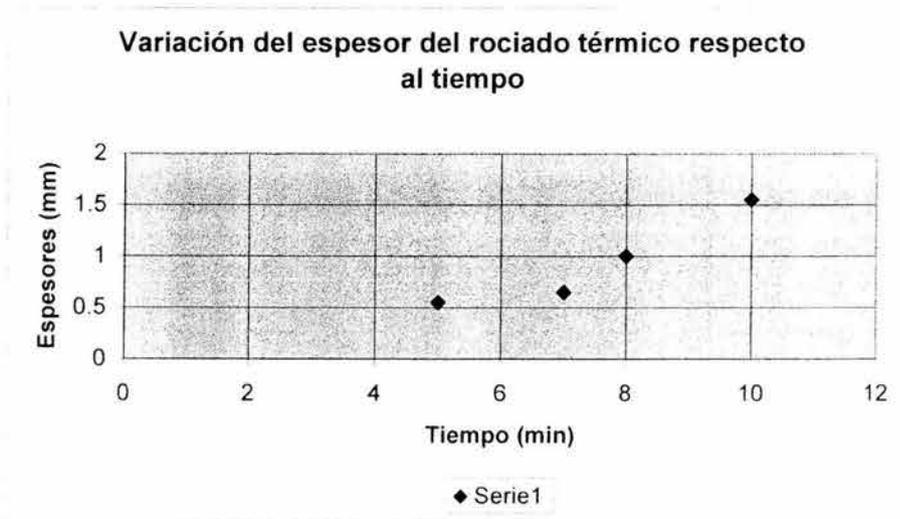


Fig. 5.20 Variación del espesor del rociado térmico respecto al tiempo.

Maquinado.

Las diferentes probetas se maquinan con herramientas de carburo a diferentes velocidades y avances, con el objetivo de ver la respuesta al corte. Inicialmente al desbastar el recubrimiento se obtuvo un buen acabado y dicho recubrimiento no sufrió ningún desprendimiento del material base por lo que se garantiza que los parámetros de granallado y rociado térmico son adecuados para ser utilizados en el molde y de acuerdo a los datos de espesor del polvo 12C Metco las probetas se encuentran en los límites del espesor recomendados.

5.3 GRANALLADO Y ROCIADO TÉRMICO EN PLACA DE ACERO 1018 CON LA CAVIDAD SELECCIONADA DEL MOLDE.

- Se maquinó una placa de acero 1018 con la geometría del molde, para posteriormente realizar el granallado y rociado térmico (Fig. 5.21 y Fig. 5.22) antes de realizarlo en el molde, con el objetivo de experimentar con la geometría del molde y ver los inconvenientes que se tengan al realizar el granallado y rociado térmico.
- La placa con la cavidad seleccionada se granalló en un tiempo aproximado de 2 horas, con los parámetros ya mencionados (Pág. 99,100 respectivamente) para posteriormente realizarle el rociado térmico, en el cual se observó una dificultad tanto en el granallado como en el rociado térmico en las paredes de la cavidad, por lo que dependerá de la habilidad del operador para obtener buenos resultados. El proceso en su variación de autofundente se realizó en un horno eléctrico con el objetivo de que sea homogéneo el proceso de autofundente en toda el área del recubrimiento, (Fig. 5.23 y Fig. 5.24). Se introduce la cavidad seleccionada en el horno alcanzando una temperatura de fusión del recubrimiento de 1010 °C en un tiempo de 10 minutos de autofundente, para después ser enfriado lentamente en el horno.

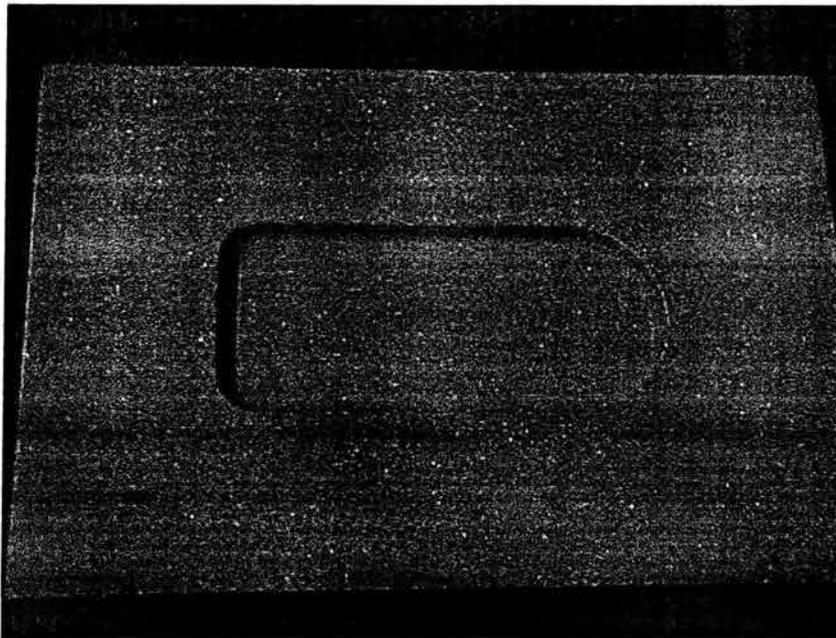


Fig. 5.21 Geometría granallada.

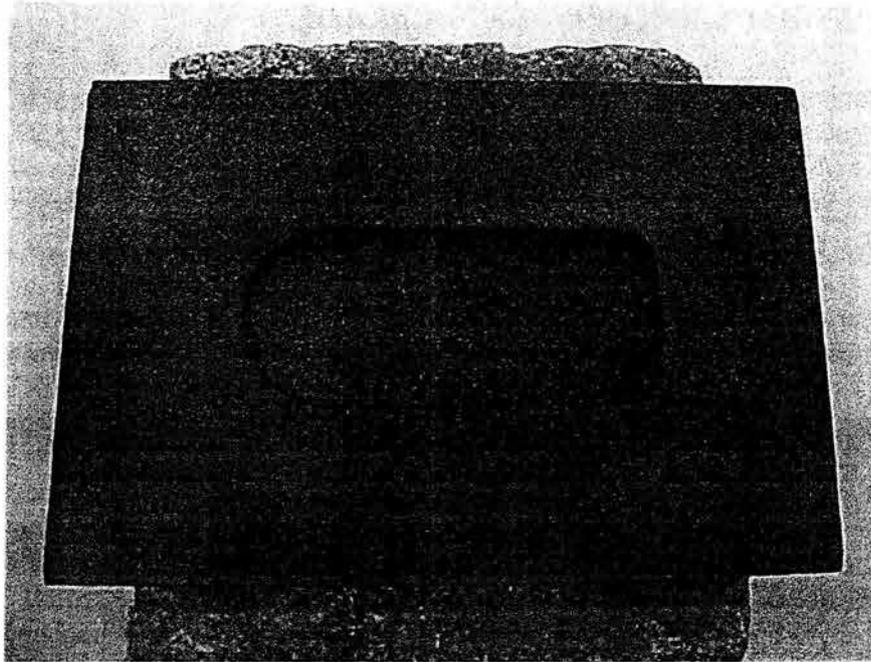


Fig. 5.22 Geometría rociada térmicamente.

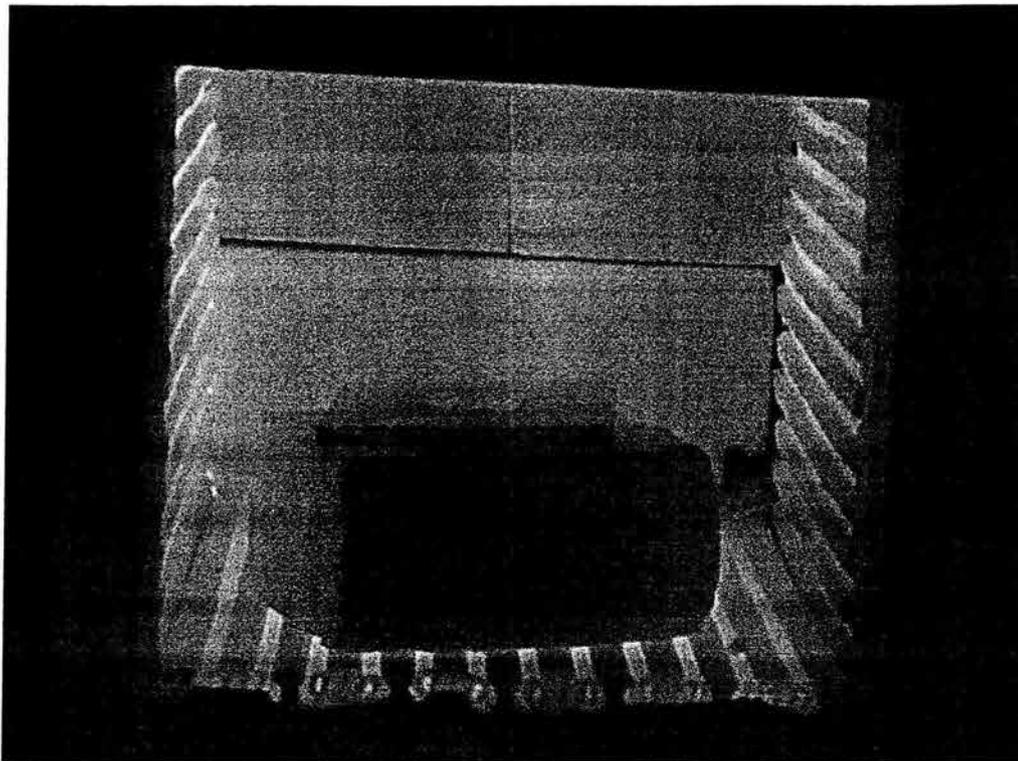


Fig. 5.23 Realización del proceso de autofundición en un horno eléctrico.

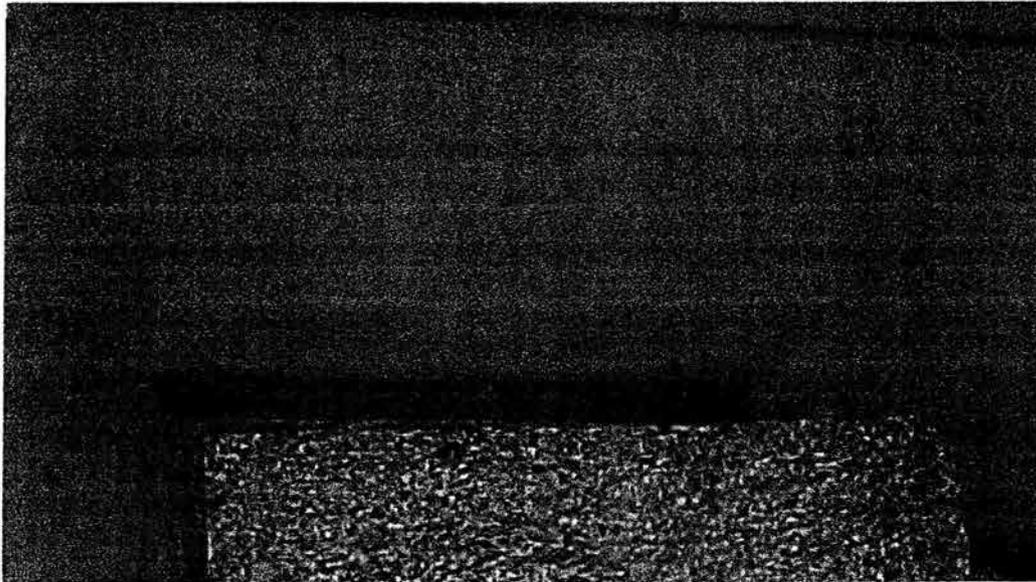


Fig. 5.24 Material autofundido al rojo vivo.

5.4 RESULTADO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES:

Lo que podemos observar con este proceso de proyección térmica es que si existe aparentemente una buena adherencia del material base con el recubrimiento, con lo que se lleva realizado en el proceso de experimentación, es decir con las pequeñas probetas y con la placa maquinada con la geometría del molde. Por ello se decide tomar los parámetros siguientes:

En el granallado (Presión de 9 – 11 Bars con distancia de aplicación de 5 – 10 cm para obtener un granallado uniforme con parámetros de rugosidad de 10 μm ya que si utilizamos una presión menor (6 Bars) no se obtiene el granallado adecuado y por lo tanto el recubrimiento no podría adherirse), tomando en cuenta que después del granallado se recomienda aplicar lo más pronto posible el proceso de proyección térmica con el fin de evitar oxidación en la superficie, suciedad, etc.

En el proceso de proyección térmica se toman los parámetros de la Tabla 5.1 de Metco (Pág. 100), en su variación autofundente realizada en un horno eléctrico se alcanza una temperatura de 1010°C y se enfría lentamente en el horno. Estos parámetros son los que utilizarán en el molde de una manera proporcional a sus dimensiones.

CAPITULO 6

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

6.1 GRANALLADO Y ROCIADO TÉRMICO DEL MOLDE.

Al aplicar la técnica de rociado térmico por flama a la pieza de trabajo (molde), primeramente se deben tapar todas aquellas secciones de la pieza, que no se deseen granallar y recubrir con este procedimiento (barrenos de botadores y orificios de sujeción) (Fig. 6.1).

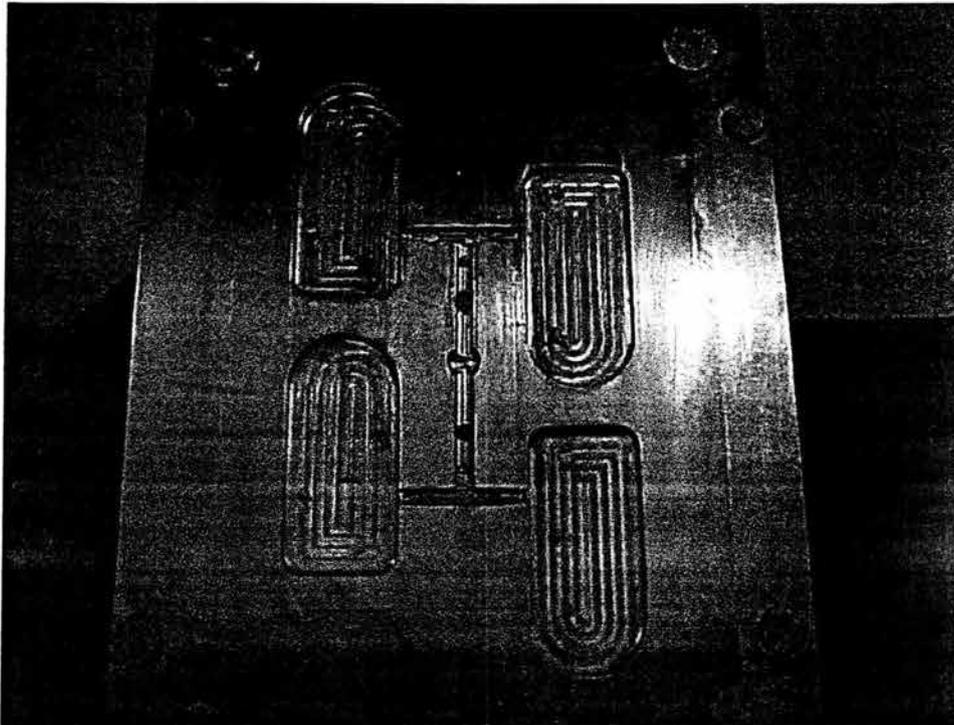


Fig. 6.1 Molde con insertos (mascarilla).

Una vez colocados los insertos en el molde, se procede a granallar dicha pieza en un tiempo aproximado de 12 horas efectivas de trabajo, utilizando los parámetros de granallado ya establecidos (Presión de 9-11 Bars y una distancia de proyección de 5-10 cm).

A continuación en las siguientes figuras se muestra la secuencia del granallado del molde:

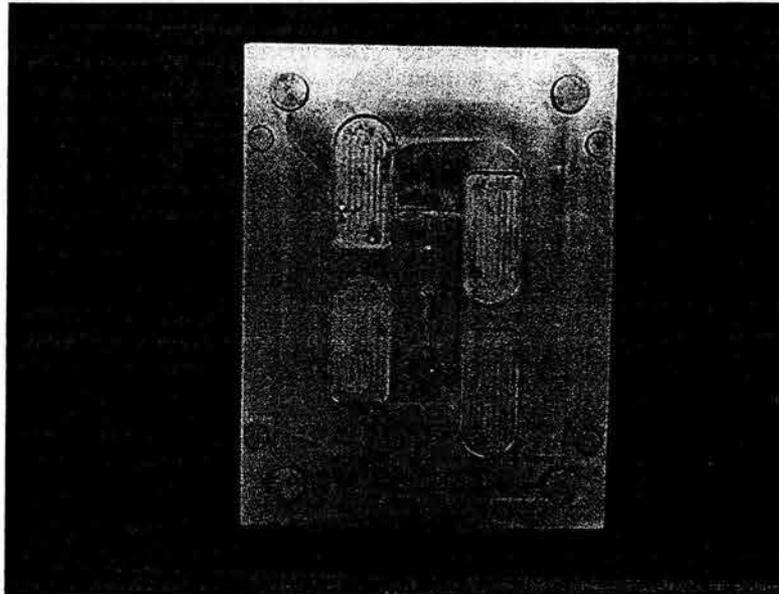


Fig. 6.2 Molde sin granallar.



Fig. 6.3 Equipo utilizado para el granallado.



Fig. 6.4 Granallado del molde.

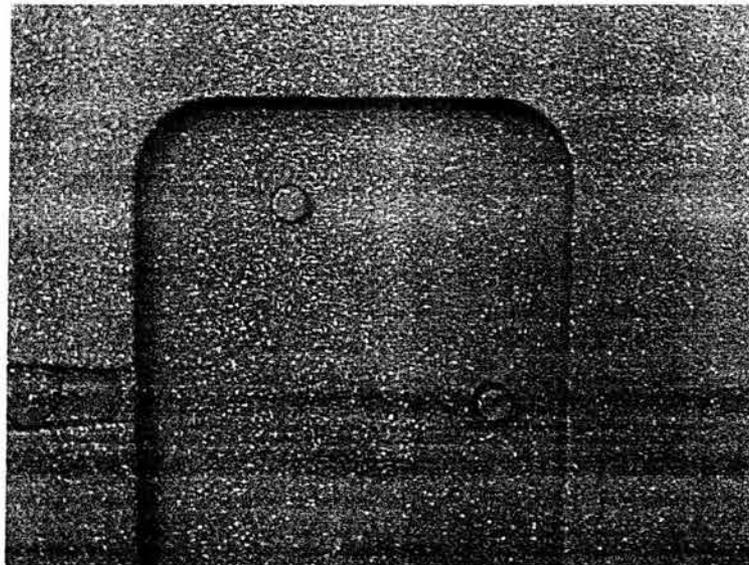


Fig. 6.5 Sección granallada del molde.

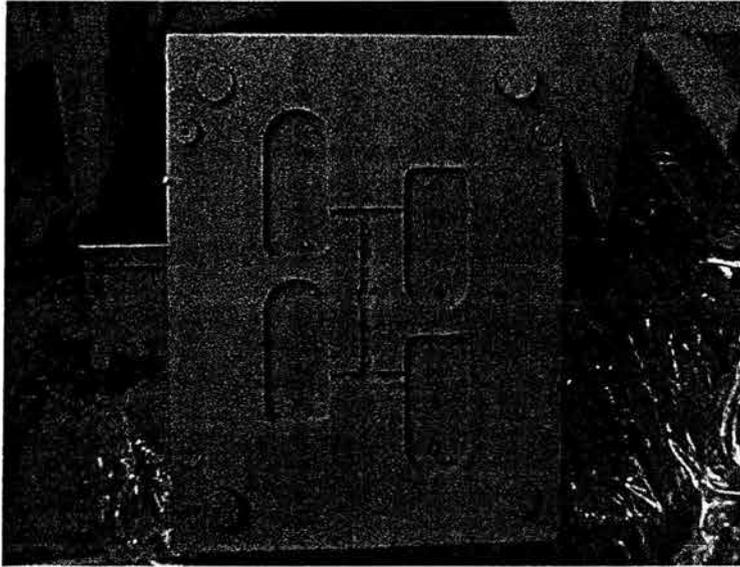


Fig. 6.6 Terminación del granallado del molde.

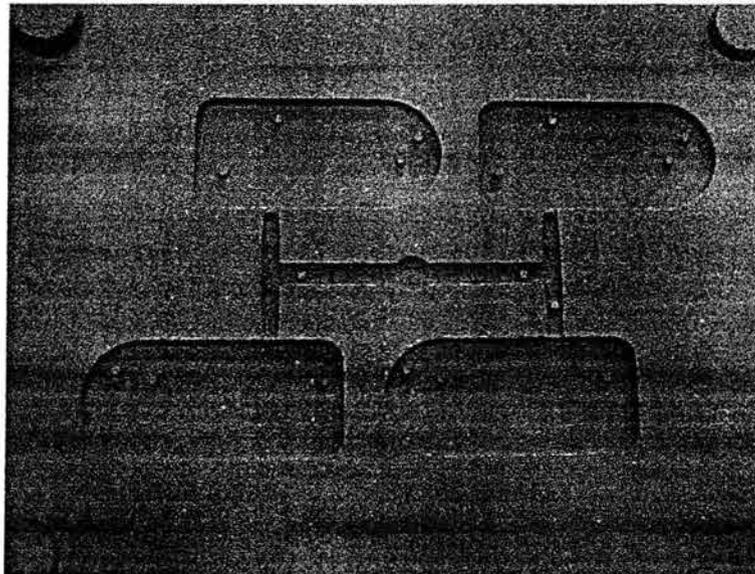


Fig. 6.7 Molde granallado con insertos.

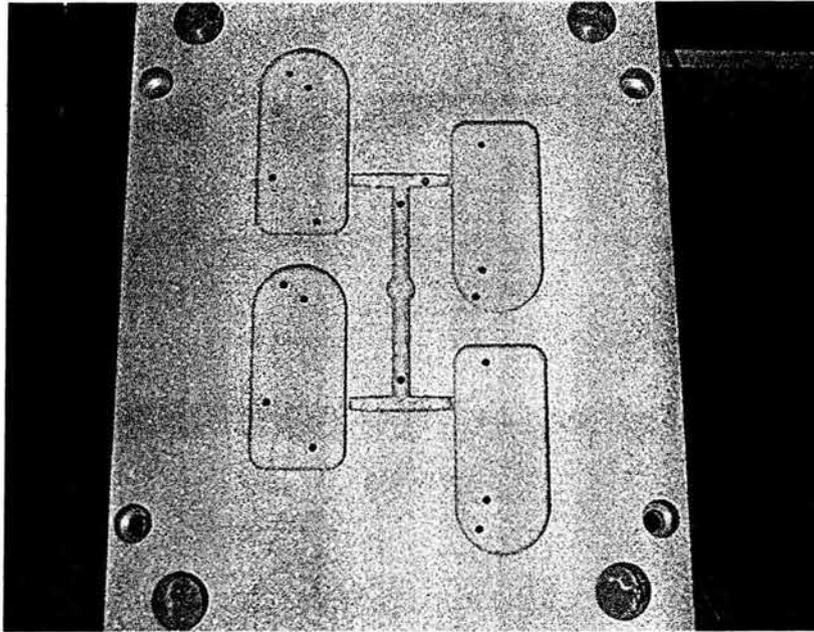


Fig. 6.8 Molde granallado sin insertos.

Después del granallado del molde, se limpia con el desengrasante Tricloroetileno para eliminar todo tipo de impurezas que pudieran estar adheridas al molde (Fig. 6.9).

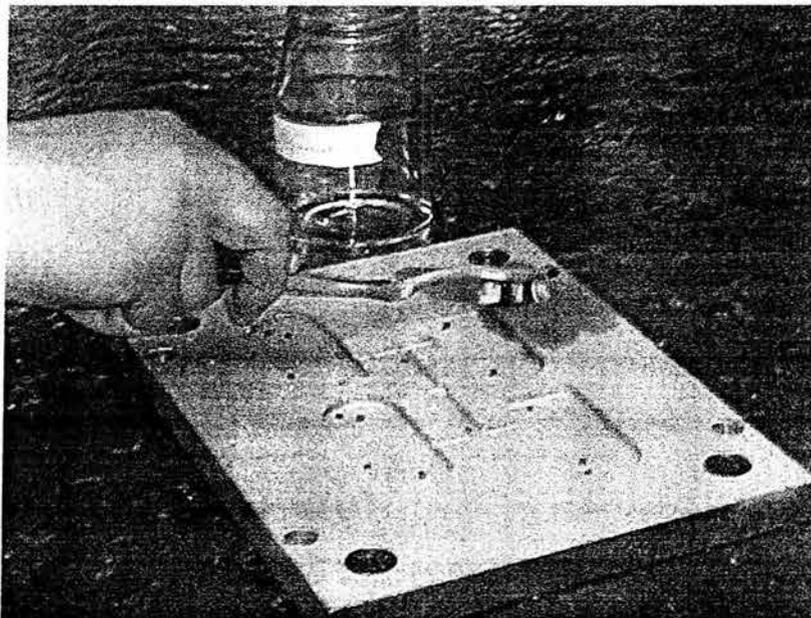


Fig. 6.9 Limpieza de la superficie del molde con Tricloroetileno.

Después de obtener la limpieza de la superficie, se realiza un precalentamiento con el equipo de proyección con el objetivo de que el molde eleve su temperatura y cuando se proyecte la aleación de Níquel-Cromo-Boro adquiera una mejor adherencia con el metal base (Fig. 6.10).

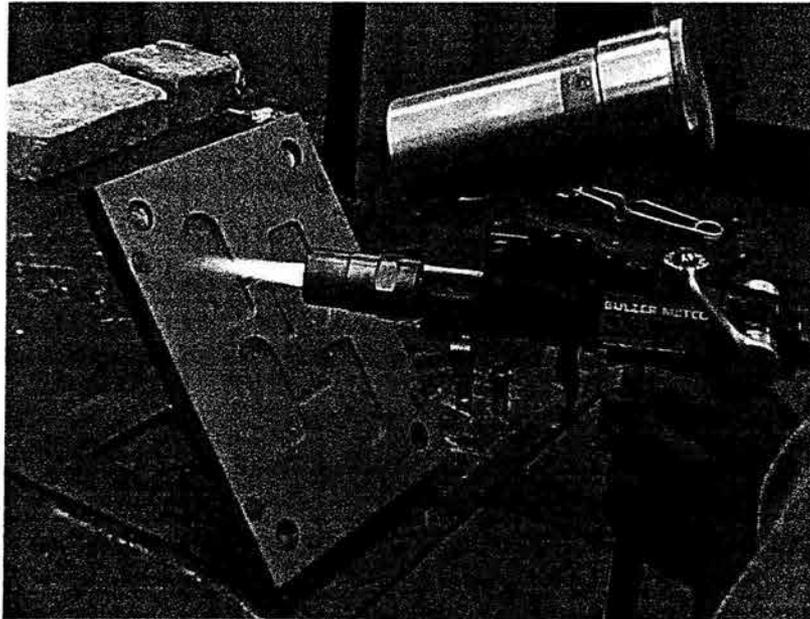


Fig. 6.10 Precalentamiento de la superficie del molde.

Ya obtenido el precalentamiento de la superficie se procede a aplicar el proceso de proyección térmica por flama en un tiempo aproximado de 120 minutos, tiempo en el cual se proyectó por 12 ocasiones el área total de la superficie del molde (10 minutos por cada ocasión) (Fig. 6.11 - Fig. 6.16).

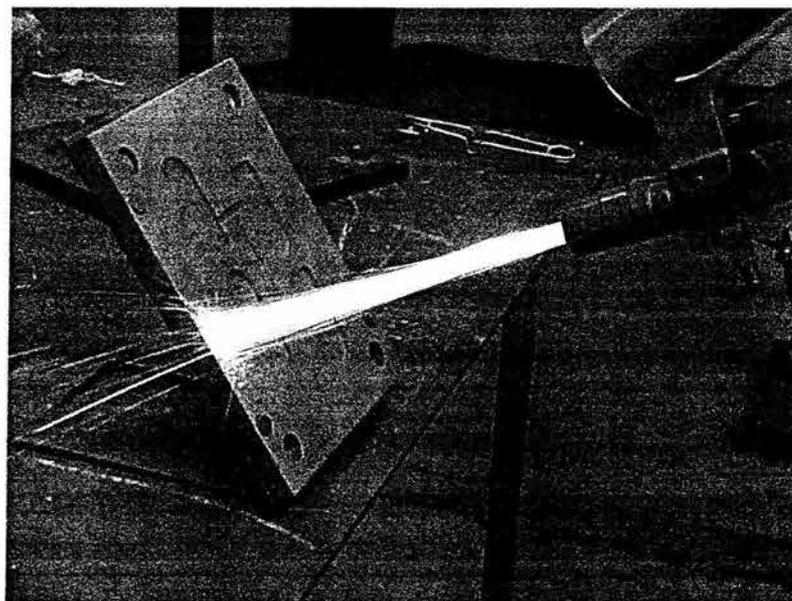


Fig. 6.11 Rociado térmico del molde.



Fig. 6.12 Rotación del molde en 90 grados, respecto a su posición original.

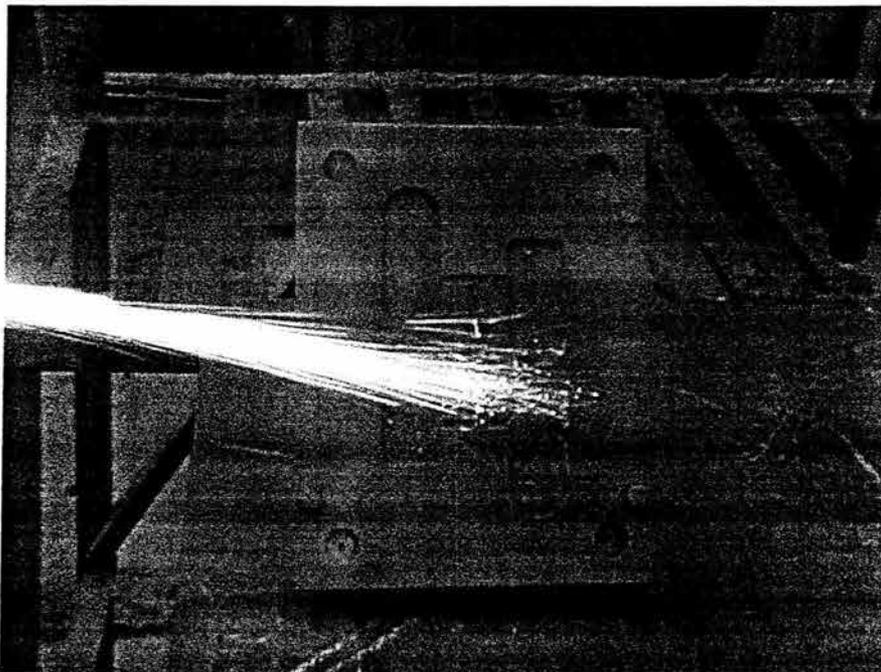


Fig. 6.13 Rociado térmico aplicado perpendicularmente a las paredes de las cavidades del molde.

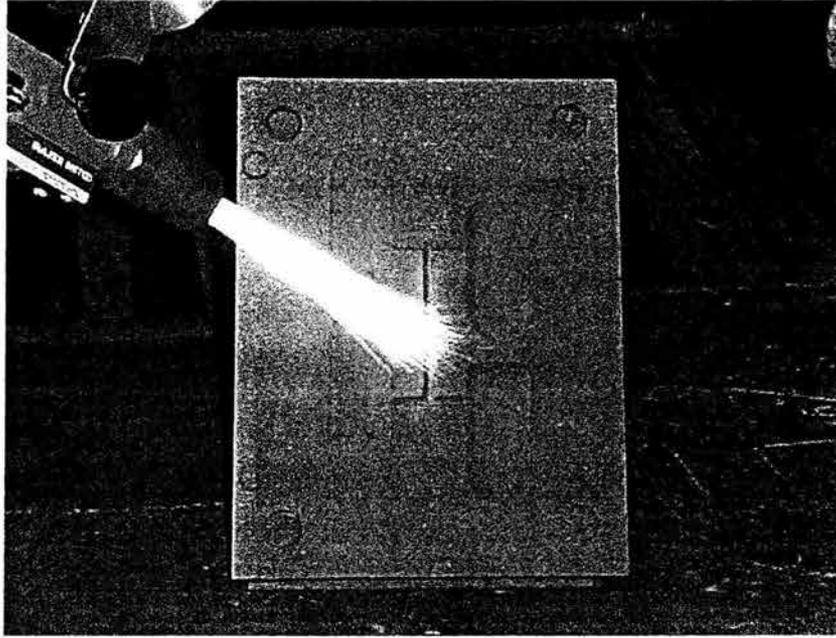


Fig. 6.14 Rociado térmico aplicado a los canales de inyección del molde.

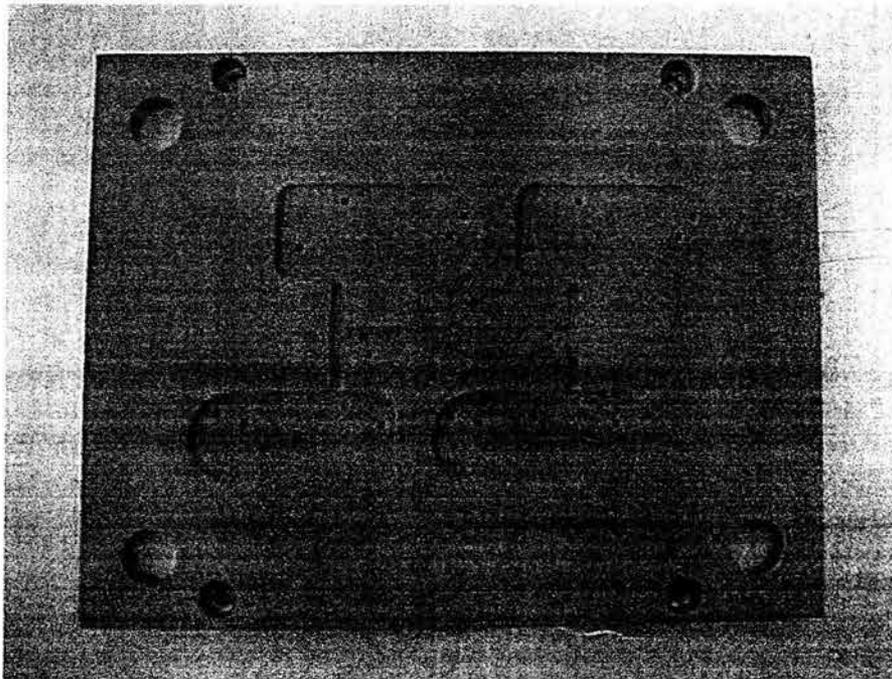


Fig. 6.15 Molde rociado térmicamente.



Fig. 6.16 Acercamiento del molde (material base y recubrimiento).

Una vez realizada la proyección térmica en el molde, se realiza el autofundente del recubrimiento por medio de un horno eléctrico, con el objetivo de que se adquiriera una mejor adherencia entre las mismas partículas del recubrimiento y el material base, al igual que reducir la porosidad.

El horno se calibra a una temperatura 1010°C , una vez que alcanzó esta temperatura se introduce el molde al horno, bajándose inmediatamente la temperatura de este hasta 795°C debido a que existe una transferencia de calor entre la placa y el horno. Transcurridos 60 minutos, el horno nuevamente alcanza los 1010°C , controlándose la temperatura de la placa por medio de un Termopar, el cual es colocado en un barreno ubicado a un costado del molde. Con este termopar se observa la temperatura real que alcanza la placa la cual debe ser de $1010^{\circ}\text{C} - 1060^{\circ}\text{C}$ para que el recubrimiento alcance su punto de fusión (Fig. 6.17). Otro punto a mencionar es la introducción de argón al horno para evitar la oxidación de la placa.

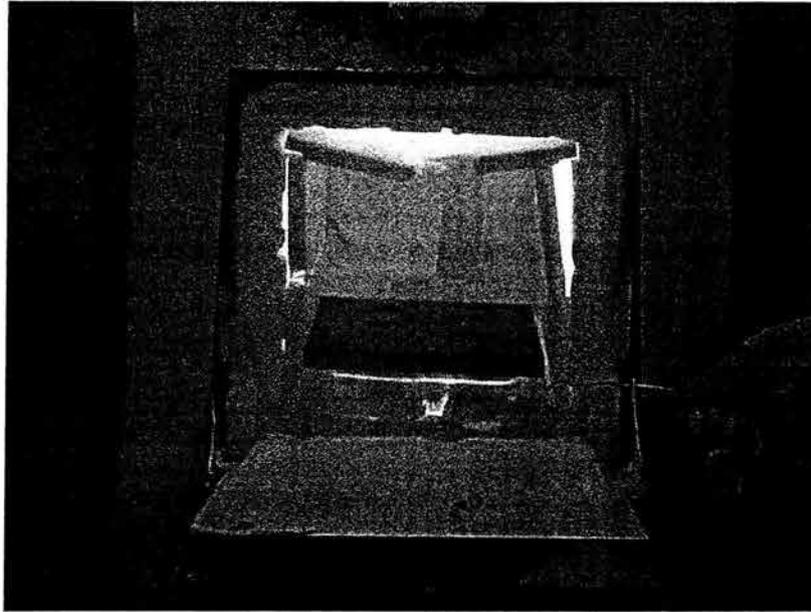


Fig. 6.17 Introducción del molde al horno y colocación del termopar.

Después de que el molde alcanza la temperatura deseada 1010°C , se dejan transcurrir 25 minutos en su fase autofundente, alcanzándose un registro de temperatura de 1050°C e inmediatamente se procede a sacar el molde del horno y es enfriado al aire (Fig. 6.18, Fig.6.19).

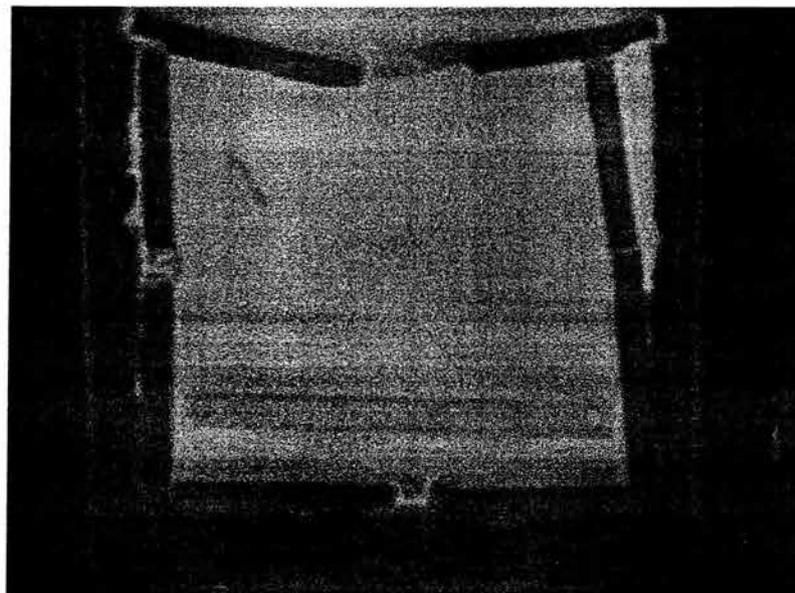


Fig. 6.18 Molde a 1050°C .

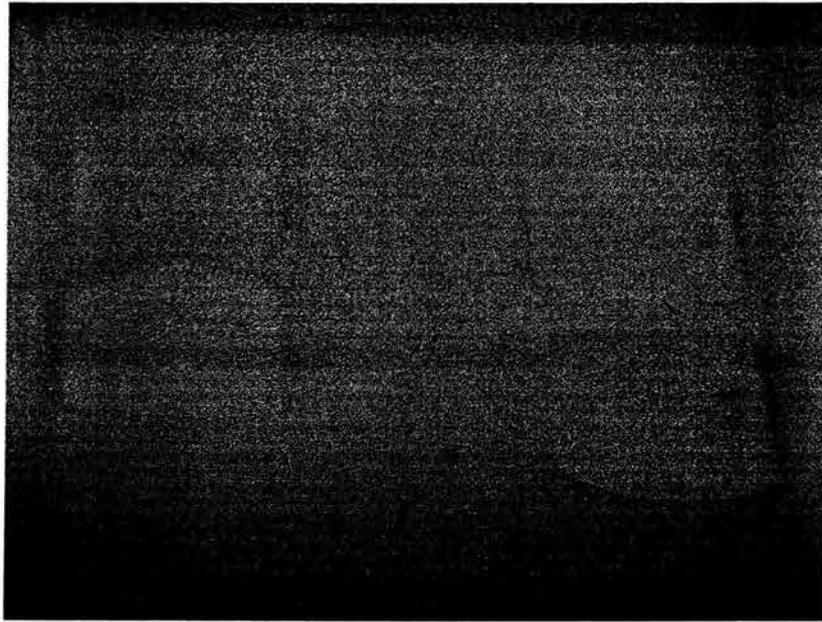


Fig. 6.19 Enfriamiento al aire.

-El molde después de 24 horas de enfriamiento presenta una tonalidad verdosa, probablemente ocasionada por la oxidación que se pudiese haber presentado en el transcurso del proceso del autofundido debido probablemente a un exceso de tiempo en el horno (ya que este horno para alcanzar ciertas temperaturas tardaba demasiado), insuficiente suministro de argón para evitar la oxidación, cambio repentino del área de enfriamiento, etc. (Fig. 6.20 – Fig. 6.22).

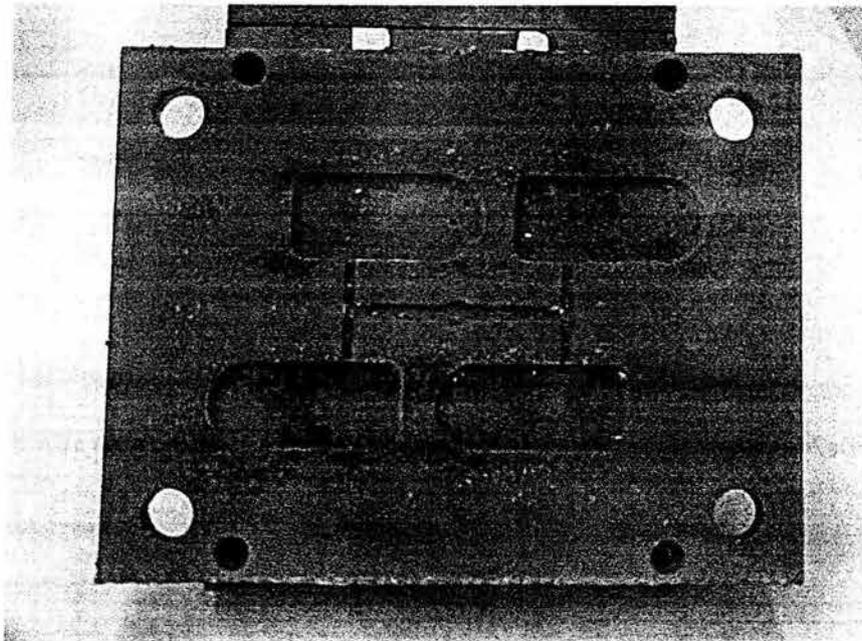


Fig. 6.20 Aspecto del molde después del proceso de autofundición del recubrimiento.

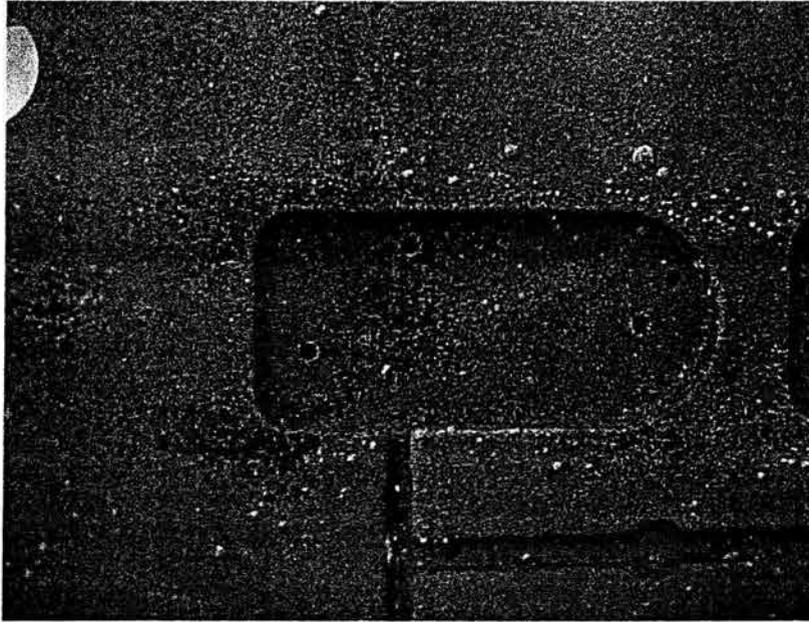


Fig. 6.21 Acercamiento a una de las cavidades del molde.

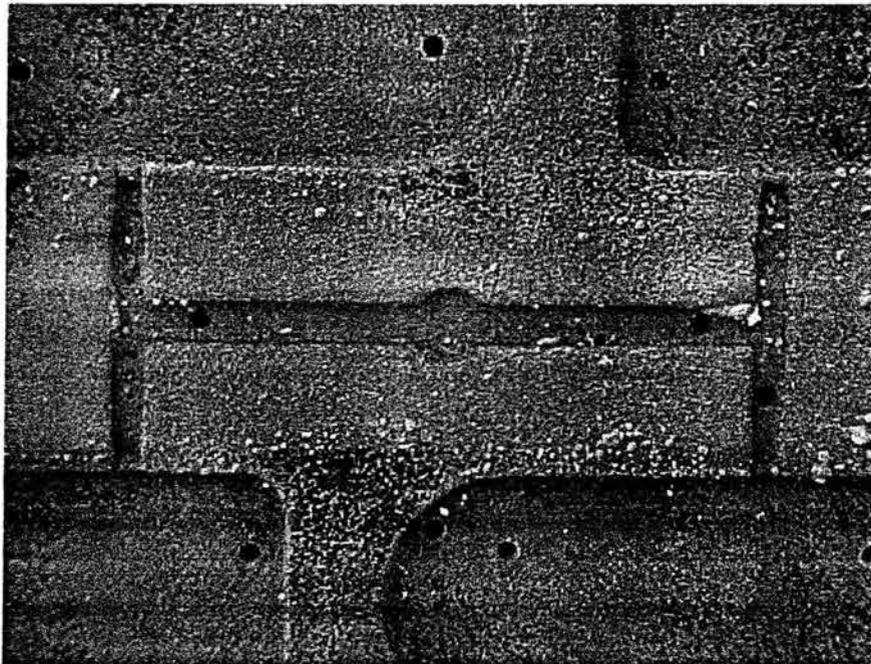


Fig. 6.22 Acercamiento a los canales de inyección.

-Después de realizar el autofundente del recubrimiento se procede a rectificar la placa del molde, para garantizar una planicidad en la superficie posterior y anterior del molde (Fig. 6.23 – Fig. 6.25), en el cual posteriormente se observaron algunas pequeñas fisuras en las esquinas de algunas cavidades.

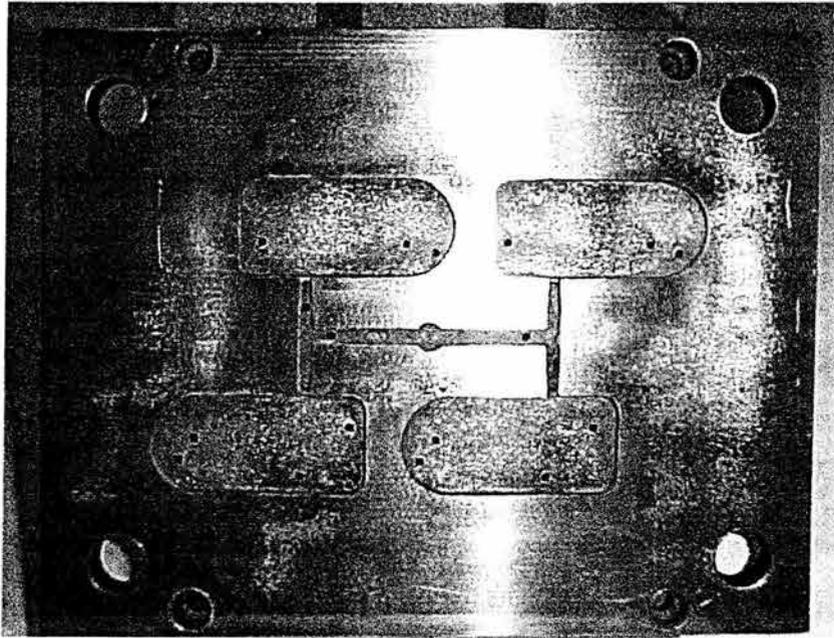


Fig. 6.23 Molde rectificado.

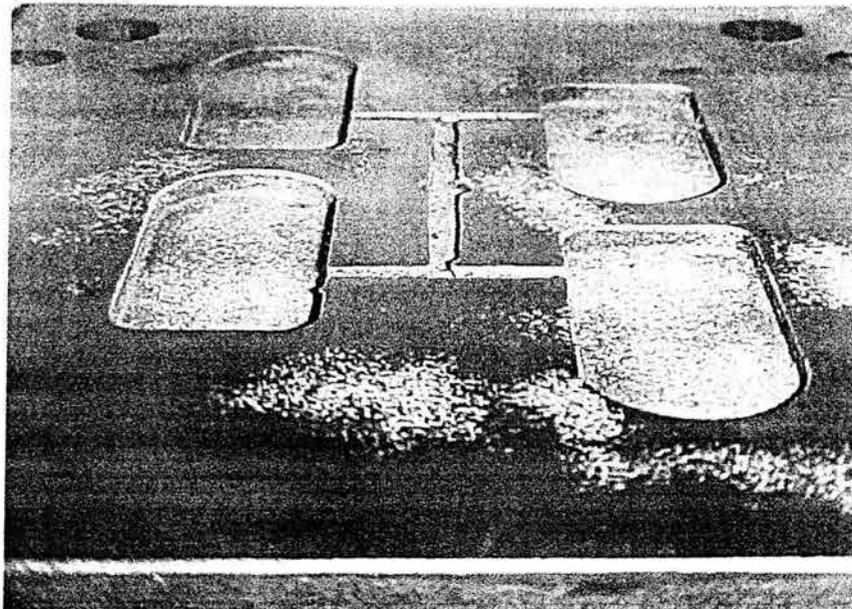


Fig. 6.24 Molde rectificado observándose el material base y el recubrimiento.

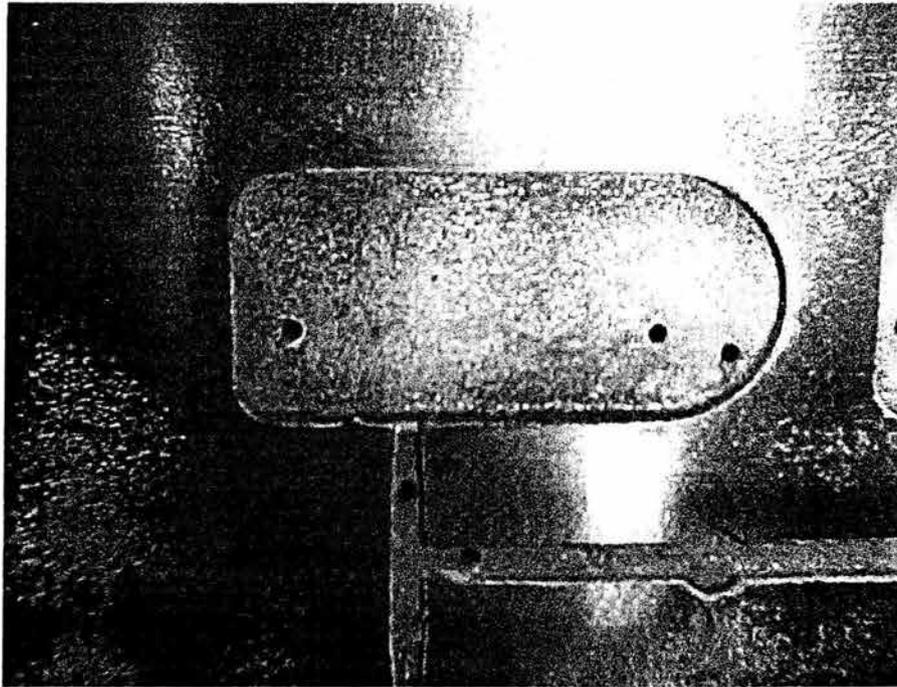


Fig. 6.25 Acercamiento al molde y canales de inyección.

6.2 PROCESO DE INYECCIÓN CON EL MOLDE RECUBIERTO.

Después de rectificar el molde se procede a tomar mediciones de rugosidad en una de las cavidades del molde, antes de realizar el proceso de inyección para determinar si hubiera algún desgaste del recubrimiento después de un determinado número de inyecciones, obteniéndose las siguientes lecturas del rugosímetro:

Lecturas de rugosidad y promedio.

Características:

Unidades: Sistema Métrico.

Longitud de la muestra: 24 mm

Velocidad de trabajo: 0.25 mm/sec

Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 6	Promedio
Ra = 15.8 μ m	Ra = 16.3 μ m	Ra = 15.8 μ m	Ra = 14.4 μ m	Ra = 13.8 μ m	Ra = 16.0 μ m	Ra = 15.35 μ m

Se procede a armar el molde para ser montado en la máquina de inyección ERGOtech pro 500 – 270, que se encuentra en los talleres de Ingeniería Mecánica de la Facultad y poder realizar el proceso de inyección para observar el comportamiento del recubrimiento en el molde (Fig. 6.26). La máquina ERGOtech pro 500 – 270 se observa en la figura 6.27 y sus datos técnicos se anexan en la Tabla 6.1.

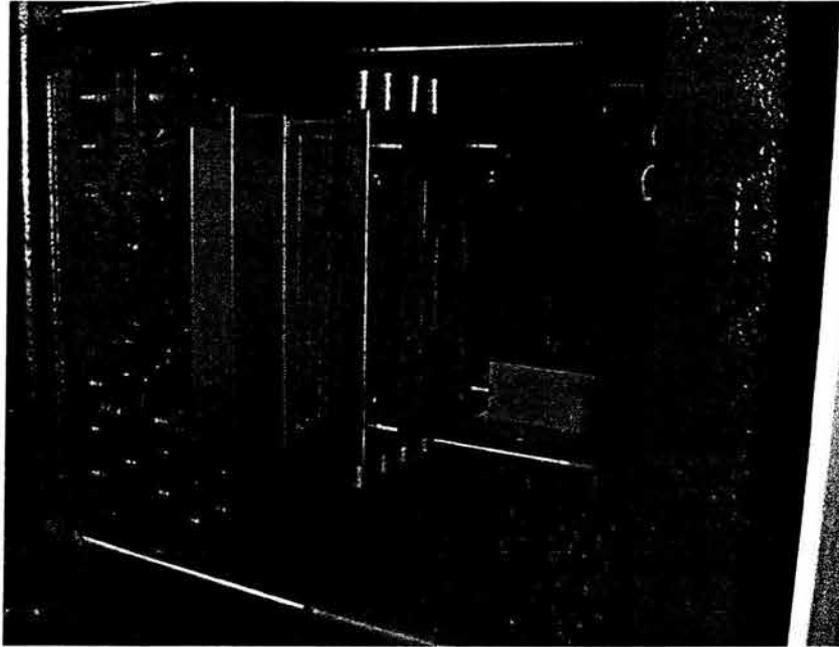


Fig. 6.26 Molde montado en la máquina de inyección.

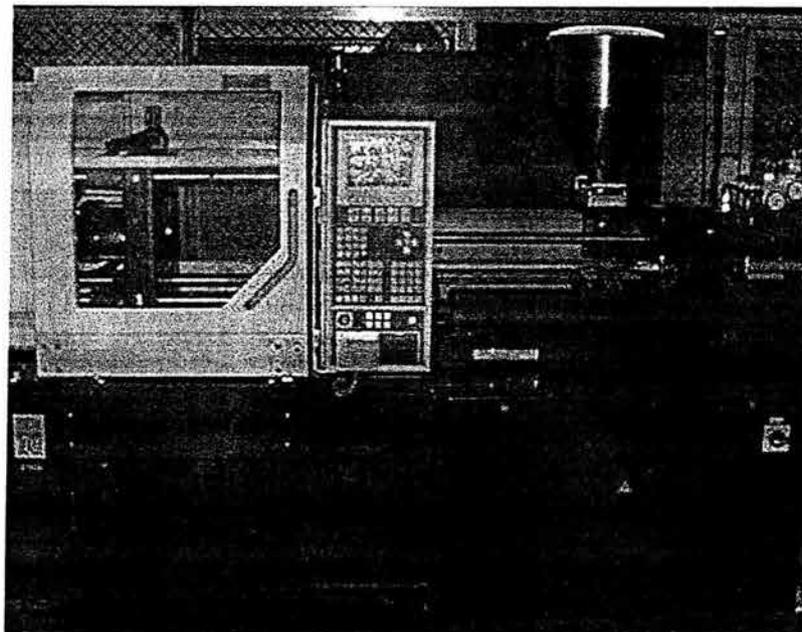


Fig. 6.27 INYECTORA ERGOtech pro 50-270

DATOS TÉCNICOS:

Denominación del Modelo: ERGOtech pro 500 – 270

Medidas Internacionales: 500 – 270

Tabla 6.1 Datos técnicos de la máquina de inyección ERGOtech pro 500 – 270

Unidad de Cierre	Unidades	500
Fuerza de cierre	kN	500
Fuerza de enclavamiento	kN	500
Carrera máxima de apertura	mm	400
Altura mínima de molde	mm	210
Altura máxima de molde	mm	-
Distancia máx. entre platos portamoldes	mm	610
Platos portamoldes	mm	540 x 540
Distancia útil entre columnas	mm	355 x 355
Peso máximo de molde	kg	400

Expulsor Hidráulico	Unidades	
Carrera expulsor	mm	125
Fuerza expulsor	kN	41.2
Fuerza de retroceso expulsor	kN	14.9

Unidad de inyección:		270		
Cilindro plastificador	Unidades	A	B	C
Diámetro del husillo	mm	30	35	40
Relación L/D		23.3	20.0	17.1
Presión de inyección	bar	2573	1890	1447
Volumen desplazado	ccm	106.5	144.3	188.5
Peso pieza inyectada (PS)	g	95	128	168
Carrera máxima de dosificación	mm	150		
Carrera máxima de boquilla	mm	250		
Profundidad de inmersión de boquilla (SVO)	mm	40		
Presión de apoyo de boquilla	kN	66		
Potencia inst. calefacción de cilindro	kW	7.5		
Capacidad de tolva	Ltr.	35		

Datos Generales	Unidades	
Capacidad del tanque de aceite	Ltr.	135
Grupo motobomba	kW	11.0
Potencia total instalada	kW	18.5
Peso neto (sin aceite)	kg	2500
Medidas L x A x Alt.	m	3650 x 1150 x 1770

Para el proceso de inyección se determina utilizar el material CELSTRAN (Polipropileno reforzado con 50% de fibras de vidrio (largas)) debido a que este material es uno de los más abrasivos y poder así determinar como se comporta el recubrimiento durante este proceso en condiciones muy severas de trabajo, las características del Celstran se mencionan a continuación:

Características:

Celstran (Polipropileno reforzado con fibras de vidrio) es un material termoplástico ingenieril de forma cristalina, es un material de bajo costo comparado con el nylon reforzado con fibras cortas, con sus apropiadas temperaturas de aplicación pero con mayor resistencia al impacto. Este puede ser usado para reemplazar el vidrio en aplicaciones de laminas termoplasticas, ofreciéndonos un bajo costo en su procesamiento.

Grados:

Celstran (Polipropileno reforzado con fibras de vidrio largas) se encuentra disponible en 30%, 40% y 50% de fibra de vidrio. Celstran PP es manufacturado con cuatro diferentes grados de resina: Químicamente añadido con PP, Químicamente añadido con PP y estabilizado al calor, alto desempeño y fácil flujo. El procesamiento de moldeo es idéntico para todos los grados.

Condiciones de secado:

Celstran (Polipropileno reforzado con fibras de vidrio) puede ser secado con un mínimo de 2 horas a 93.3 °C.

Condiciones de uso:

En la siguiente tabla se muestran las temperaturas del proceso para el Celstran PP.

Tabla 6.2 Temperaturas de operación para el material Celstran PP

Procesamiento de Temperaturas ($\pm 5.55^{\circ}\text{C}$)						
Tipo de Material	Zona Trasera	Zona Central	Zona Frontal	Boquilla	Material Fundido	Molde
PP-GF30-02	198.9	204.4	210.0	204.4	210.0	65.5
PP-GF40-02	204.4	210.0	215.5	210.0	215.5	65.5
PP-GF50-02	210.0	215.5	221.1	215.5	221.1	65.5

Tabla 6.3 Características de operación para el material Celstran PP

Características de operación
Velocidad de Inyección: Aproximado 50.8 mm/s
Presión de Inyección: Baja a Media
Contra presión: 30 –50 psi
Velocidad del tornillo: 30 – 50 rpm
Amortiguador: 6.35 mm
Tiempo del ciclo: Checar el llenado y la expulsión de las piezas. (Dependen de la pieza)

-Se procede a inyectar el material CELSTRAN (Polipropileno reforzado con 50% de fibras de vidrio (largas)) durante 14 ciclos cada uno de 25 segundos, de los cuales 5 ciclos fueron en las 4 cavidades, observándose algunos problemas en la expulsión del material inyectado, debido a la mala ubicación de algunos botadores principalmente en un canal de alimentación, por lo que se decide inyectar solo en dos cavidades de la parte no afectada los 9 ciclos restantes (Fig. 6.28) observándose posteriormente el desprendimiento del recubrimiento en algunas secciones del perímetro de las cavidades utilizadas (Fig. 6.29 – Fig. 6.32).

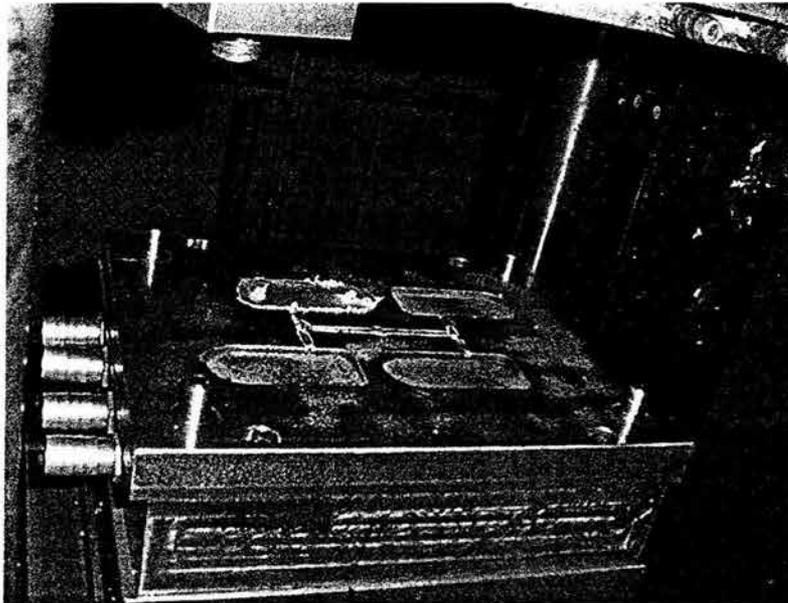


Fig. 6.28 Material atascado en una sección del molde.

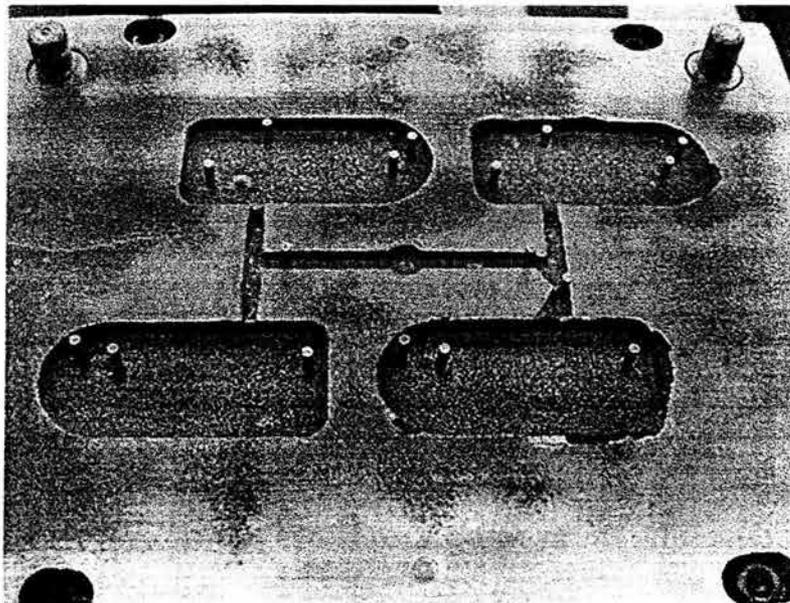


Fig. 6.29 Desprendimiento del recubrimiento en el perímetro de las cavidades.

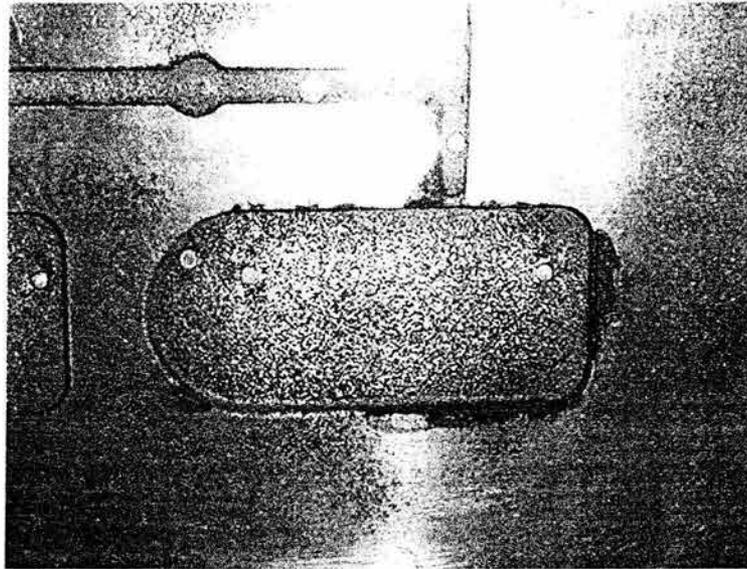


Fig. 6.30 Acercamiento en una de las cavidades afectadas.



Fig.6.31 Sección afectada.

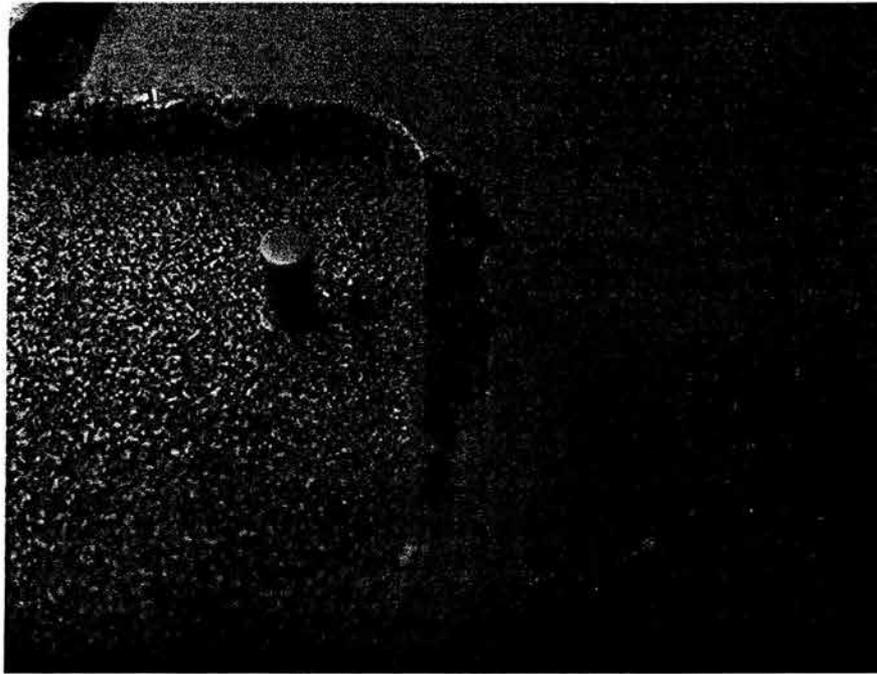


Fig.6.32 Sección afectada.

Debido al desprendimiento del recubrimiento observado en algunas zonas, se deduce que hubo una insuficiente adherencia del material ocasionada tal vez por el calentamiento excesivo durante el proceso de autofundente, el cual provocó esfuerzos residuales dando origen a la reducción de la adherencia por la presencia de óxidos. Otro posible factor puede ser que en el proceso de inyección los ángulos de salida del molde no son los adecuados ocasionando el constante atascamiento del material por esta razón los ángulos deberán ser de mayor rango.

Posteriormente se desmonta el molde y se midió su rugosidad en la cavidad seleccionada anteriormente, con ello podemos saber si hubo algún desgaste de dicha cavidad, obteniéndose los siguientes resultados.

Lecturas de Rugosidad y promedio:

Características:

Unidades: Sistema Métrico.

Longitud de la muestra: 26 mm

Velocidad de trabajo: 0.25 mm/sec

Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 6	Lectura 7	Lectura 8	Promedio
Ra=15.0µm	Ra=15.4µm	Ra=12.7µm	Ra=13.6µm	Ra=15.0µm	Ra=17.1µm	Ra=15.3µm	Ra=14.0µm	Ra=14.76µm

Promedio: Ra = 15.35 µm antes del proceso de inyección.

Promedio: Ra = 14.76µm después del proceso de inyección.

De acuerdo a los resultados de rugosidad se obtuvo una diferencia de $0.59 \mu\text{m}$ en 14 inyectadas de 25 segundos cada uno, lo que demuestra que el material inyectado es muy agresivo desgastando la superficie rápidamente por abrasión. Por lo que se recomendaría un acabado espejo en las cavidades, para evitar lo menos posible el desgaste y una mejor fluidez del material inyectado, por lo tanto el recubrimiento podría tener un mejor desempeño utilizando materiales plásticos menos agresivos sin la utilización de fibra de vidrio. Parece ser que el recubrimiento es lo suficientemente resistente para ser aplicado en moldes de inyección, siempre y cuando se tenga un mejor control en el proceso de autofundente, una mejora en los ángulos de salida, una mejor colocación de botadores, un rectificado adecuado y disminuir al máximo todos los filos en los cambios de sección para evitar problemas de desprendimiento.

Basándose en estos resultados se consigue con un éxito relativo el objetivo planteado en este trabajo, el cual fue desarrollar recubrimientos mediante la técnica de proyección térmica para la recuperación y mantenimiento de los moldes de inyección de plásticos con aceros de bajo contenido de carbono.

En la siguiente figura se observa algunas de las piezas inyectadas con el material Celstran (Polipropileno reforzado con 50% de fibras de vidrio (largas)).

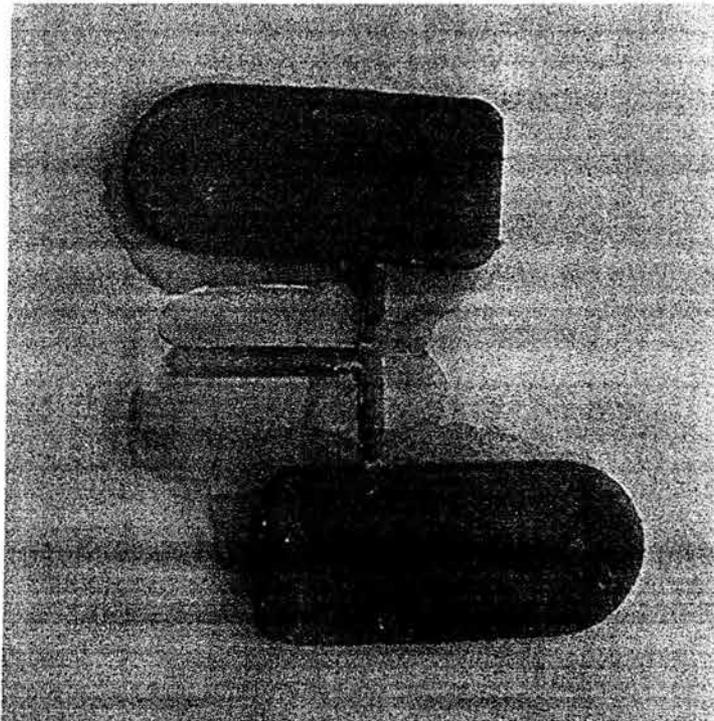


Fig. 6.33 Piezas inyectadas con Celstran PP con 50% de fibra de vidrio con tonalidad café ocasionada por las elevadas temperaturas del material inyectado.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados derivados del trabajo de investigación de la tesis, el objetivo principal que fue experimentar con la aplicación del rociado térmico a moldes de inyección de plásticos mediante la técnica de proyección por flama, se logró establecer con relativo éxito una técnica para recubrir moldes de acero al carbono como posible sucesor de moldes elaborados con aceros para herramientas.

La separación del recubrimiento que se presentó en el perímetro de algunas cavidades después del proceso de inyección se puede atribuir a la mala adherencia de la interfase metal base-recubrimiento provocada probablemente por el calentamiento excesivo durante el proceso en su variación de autofundente, lo cual pudo haber ocasionado esfuerzos residuales en el material del recubrimiento, que al contraerse en mayor medida en las esquinas provocaron el desprendimiento y tomando en cuenta que los resultados obtenidos durante la preparación del molde para ser recubierto (granallado, limpieza y proyección térmica) fueron suficientes y adecuados, por lo que el problema presentado no se puede atribuir, en cierta medida, a la preparación.

Además el proceso de proyección térmica por flama de polvos tiene bajas velocidades de proyección de partículas comparado con otros procesos de proyección térmica, este tipo de recubrimientos generalmente es de menor calidad, tienen alta porosidad y propiedades de adherencia más bajas que los otros procesos. Por lo que se considera que hay que experimentar con mayor detalle sobre recubrimientos autofundentes, como es el caso del recubrimiento METCO 12C y en un proceso posterior a la proyección térmica que mejore más la adherencia, evite las fisuras, baje la rugosidad y su resistencia a la corrosión sea adecuada, como sería el caso de un tratamiento superficial por láser.

Al observar las probetas en el Microscopio Electrónico de Barrido en el recubrimiento sin la etapa de autofundente presenta puntos donde la unión con el material base no es adecuada. Caso contrario cuando se aplica el proceso de autofundente en la interfase metal base-recubrimiento se observa que es más continua, lo cual parece mostrar una mejora en la adherencia.

En cuanto a la porosidad observada con el proceso de autofundente hay una mejora en la porosidad ya que en teoría la porosidad presente en los recubrimientos es un aspecto crítico, la cual puede variar de un 20%-1%, el cual es muy difícil de alcanzar. Dependiendo de las condiciones pueden aparecer partículas no fundidas, que por alguna razón no llegaron a la temperatura de fusión y fueron incorporadas al recubrimiento, esta generalmente interrumpe la continuidad del mismo y disminuye su fuerza cohesiva. Cuando se rocían metales o aleaciones parte de ellos se pueden oxidar y aparecen entonces inclusiones de óxido en el recubrimiento. Esto puede resultar benéfico, inclusive un alto porcentaje de óxidos en el recubrimiento, puede mejorar la dureza y resistencia del mismo.

Al tomar mediciones de microdureza Vickers se observó que se puede alcanzar aproximadamente el triple del valor de la dureza en el recubrimiento respecto al material base, lo cual hace suponer buenos resultados cuando la exigencia de la resistencia al desgaste no sea muy severa, además esto se reflejaría en una reducción de costos en la fabricación de piezas con aceros de bajo carbono respecto al de usar aceros para herramienta.

Una de las ideas principales que era recubrir el molde con este tipo de proceso para protegerlo contra el desgaste, la cual si se consigue en un determinado aspecto ya que en la parte superior del molde cuando se rectificó se observó que el recubrimiento era difícilmente maquinable, por lo cual suponemos que en el fondo de las cavidades el recubrimiento respondería de la misma manera, pero por la falta de adherencia del material del recubrimiento en las partes críticas no se pudo comprobar de manera eficaz este comportamiento, ya que con los valores de rugosidad obtenidos antes y después del proceso de inyección en el recubrimiento, nos indican que si existió un desgaste del material en un rango de 0.59 micras lo cual se puede atribuir probablemente a que el material seleccionado como medio de aporte no posee la suficiente dureza y resistencia al desgaste para ser empleado cuando el polímero se inyecta con fibra de vidrio, esto reedita en que al utilizar materiales menos agresivos al desgaste el recubrimiento resistirá perfectamente para la aplicación de inyección.

También es importante resaltar que la geometría de las cavidades del molde juega un papel muy importante para ser susceptibles de recubrirse, ya que por lo observado en este trabajo se aprecia que no es bueno para cavidades muy pequeñas y de geometrías complejas.

En general se considera que el proceso tal como se aplicó y el recubrimiento logrado funcionan, aunque éste presentó limitaciones en la adherencia alcanzada, la complejidad de la geometría que puede recubrirse y el tipo de polímero que se puede inyectar (por ejemplo sin fibra de vidrio).

A partir de esto se considera que el proceso puede constituir una alternativa digna de tomar en cuenta y seguirse desarrollando si se consiguen mejoras con:

- Un tratamiento posterior que consiga incrementar la adherencia y disminuir la porosidad.
- Acentuar el cuidado en la atmósfera del proceso.
- Experimentando con sistemas de calentamiento novedosos, como el haz láser, para mejor adherencia y reducir porosidad.

Sugerencias para un trabajo posterior:

- 1) *Granallado*: Utilizar un equipo con recuperación de abrasivo, mayor alimentación, presión, etc. Podrían ser las de tipo cabina y de esta forma obtener un menor tiempo en el granallado.
- 2) *Limpieza*: En la limpieza se recomienda, en una tina por medio de un baño y cepillos metálicos, utilizando Tricloroetileno ó acetona.
- 3) *Rociado térmico*: Automatizar la pistola por rociado térmico 5P-II para tener un mejor control en la proyección sobre todo en piezas que sean complejas donde existan cambios de sección ya que el proceso de rociado térmico al cambiar el ángulo de proyección incrementará la porosidad del recubrimiento y por lo tanto puede disminuir la adherencia, por lo que se recomienda que la proyección sea uniforme y perpendicular a la superficie a tratar.
- 4) *En el autofundente*: Utilizar hornos con mayor respuesta de temperatura y un mayor suministro de gas inerte como por ejemplo el argón para prevenir la oxidación del recubrimiento en la pieza recubierta, además de mejorar los parámetros del proceso de autofundente para mejorar las propiedades del recubrimiento, por lo que se requiere de estudios adecuados para trabajos posteriores.
- 5) *El maquinado*: se debe realizar con cuidado para evitar el desprendimiento del recubrimiento, y evitar los filos al máximo para obtener una buena adherencia del recubrimiento a la hora de realizarlo.
- 6) Se recomienda que para trabajos futuros de rociado térmico aplicado al mantenimiento o recuperación de moldes de inyección, sólo se recubran las cavidades de interés por trabajar y no en toda la superficie. puesto que el área que trabaja con más intensidad y la que sufriría mayor desgaste serán los canales de alimentación y las cavidades y no en el perímetro de ellas, ya que estas fueron las secciones que sufrieron un mayor deterioro.
- 7) *Tratamiento posterior*: Experimentar con diversos tratamientos térmicos que puedan provocar difusión, conseguir disminuir porosidad y mejorar la adherencia.
- 8) Es conveniente experimentar con recubrimientos que produzcan mayor dureza para conseguir soportar resistencia con polímeros reforzados con fibra de vidrio.
- 9) Realizar un estudio técnico-económico para valorar los costos de aceros para herramienta vs. aceros al carbón recubiertos por proyección térmica.

ANEXO 1:

FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE UN RECUBRIMIENTO OBTENIDO POR PROYECCIÓN TÉRMICA [4].

Enlace Recubrimiento Substrato:

La microrugosidad de la superficie del sustrato obtenida por chorreado con materiales abrasivos, es crítica para una adhesión adecuada del recubrimiento. La superficie irregular ancla la capa inicial de partículas rociadas y redistribuye los esfuerzos en la interfase recubrimiento-sustrato, haciendo que el recubrimiento sea menos propenso al desprendimiento. Este mecanismo de entrelazamiento es el principal modo de adherencia, además de las fuerzas de enlace químicas y físicas; en pocos casos se logran enlaces metalúrgicos semejantes a los encontrados en recubrimientos obtenidos por inmersión en caliente (hot dip).

Defectos:

La porosidad del recubrimiento es crítica en aplicaciones que involucran el fenómeno de corrosión, ya que si se establece una ruta continua hacia el sustrato, el recubrimiento fallará prematuramente. La oxidación de las partículas durante el rociado, puede promover la formación de redes continuas de óxido en el recubrimiento, que puedan ser perjudiciales en términos de corrosión, cohesión y otros parámetros de funcionalidad.

Superficie del recubrimiento:

La textura y rugosidad de la superficie del recubrimiento son importantes respecto a sus características de desgaste. Las características superficiales del recubrimiento están influenciadas por el tamaño de las partículas de alimentación (para polvos), parámetros de aplicación del recubrimiento y método de aplicación. La rugosidad del sustrato es un factor determinante en el perfil superficial del recubrimiento. Muchas aplicaciones requieren un acabado superficial mediante un maquinado o rectificando del recubrimiento.

Esfuerzos residuales:

La deposición de partículas sobre un sustrato relativamente frío, tiende a generar esfuerzos residuales tensiles en el recubrimiento. Esto puede ocasionar el desprendimiento del recubrimiento si existe un enfriamiento rápido, principalmente en recubrimientos gruesos. El precalentamiento del sustrato reduce en algún grado los esfuerzos residuales tensiles del recubrimiento. Las diferencias de coeficiente de expansión térmica del sustrato y recubrimiento son importantes en aplicaciones donde existen ciclos térmicos. Estas diferencias pueden aminorarse parcialmente con el uso de recubrimientos de anclaje. Las consideraciones de esfuerzo son especialmente críticas para recubrimientos cerámicos, los cuales tienden a agrietarse bajo cargas tensiles.

Cambios microestructurales:

Cada partícula depositada se puede considerar como una microfundición que experimenta un enfriamiento rápido. Algunas ocasiones la solidificación puede ser tan rápida que no se tiene oportunidad de llevarse a cabo la nucleación y crecimiento de los cristales que genera la estructura normal del grano. En su lugar se pueden obtener estructuras amorfas con propiedades completamente diferentes de su contraparte cristalina. Estas estructuras metaestables se pueden convertir a formas más estables durante su servicio.

VARIABLES DETERMINANTES DEL PROCESO DE ROCIADO [4].

Uniformidad del material de alimentación:

Los materiales de alimentación pueden ser polvos prealeados fabricados por atomización, o por trituración. Algunos polvos son aglomerados de partículas aunque también pueden ser sinterizados para obtener partículas más coherentes aleadas parcial o completamente. Los polvos compuestos se generan por el revestimiento químico de una partícula o recubriendo la partícula con partículas más finas usando un aglutinante o sinterización. Algunos polvos son mezclas de diferentes aleaciones en polvo que al momento de formarse el recubrimiento se observara la diferencia en composición entre las laminillas que lo forman. La heterogeneidad en los materiales de aleación se refleja en el recubrimiento final debido al corto tiempo que las partículas permanecen a altas temperaturas y que no es suficiente para obtener una homogeneización completa. Sin embargo la heterogeneidad en la composición química no necesariamente es un factor indeseable, en algunos casos es el factor clave para la formación del recubrimiento. Los materiales de alimentación en forma de alambre generalmente son más homogéneos.

Forma de la partícula:

En los procesos que usan materiales de alimentación en polvo, la forma de la partícula puede tener una influencia importante en variables tales como velocidad de alimentación, transferencia de calor e interacciones con la atmósfera de rociado.

Distribución de tamaño de partícula:

Las interacciones entre partículas, fuente de calor, la atmósfera y substrato dependen del tamaño de una partícula dada. En los procesos alimentados por polvos se desea tener un rango estrecho de tamaño partícula para que se puedan ajustar los parámetros de rociado y lograr un calentamiento óptimo de las partículas. Sin embargo por consideraciones económicas el rango de distribución es más amplio, incrementando con esto la proporción de partículas sin fundir y sobre calentadas(excesivamente oxidadas).

Calentamiento de la partícula:

Un paso crítico en los procesos de termorrociado es la transferencia de energía de la fuente de calor al material de alimentación. Generalmente, una gran fracción de las partículas rociadas están fundidas al momento del impacto. Sin embargo, un calentamiento excesivo, arriba del punto de fusión, puede conducir a una fragmentación indeseable de las partículas cuando golpean la superficie del sustrato, además de incrementar los esfuerzos residuales, oxidación y promover la vaporización selectiva que puede cambiar la composición de la aleación. Para la formación de un buen recubrimiento no es necesario que las partículas alcancen su punto de fusión, la energía cinética de las partículas actúa como un plastificante de la partícula al momento del impacto, además de que puede convertirse en calor induciendo microsoldaduras locales en el sustrato o sobre las partículas previamente depositadas. El calentamiento de la partícula, también puede llevarse a cabo por el calor generado a partir de reacciones exotérmicas de las partículas.

Velocidad de la partícula:

Si se incrementa la velocidad de las partículas se puede observar un recubrimiento denso más adherente. Esta es la ventaja esencial de los sistemas de detonación y HVOF. Los sistemas de combustión convencional de polvos tienen las velocidades de partículas más bajas y esto se refleja en propiedades más pobres del recubrimiento (bajas fuerzas de enlace, alta porosidad) comparado con otros sistemas alimentados por polvos. La importancia de la velocidad se relaciona con la conversión de la energía cinética de la partícula a otras formas de energía al momento del impacto y a la conformación de las partículas sobre la superficie del sustrato.

Atmósfera de rociado:

La oxidación de las partículas es perjudicial en el caso de recubrimientos metálicos, particularmente si se forma una cubierta de óxido sobre la superficie de las gotas. La fragmentación e inclusión de estos óxidos disminuye la adhesión y cohesión y confiere mayor porosidad al recubrimiento. Estos problemas se pueden minimizar utilizando cámaras de rociado a presión reducida o en gas inerte y usando gas inerte en lugar de aire comprimido para lograr la atomización en los sistemas de rociado por arco eléctrico. En algunos casos son deseables las reacciones con la atmósfera de rociado, por ejemplo cuando se requieren reacciones exotérmicas, oxidación o nitruración de las partículas para mejorar la resistencia al desgaste o la formación de otros compuestos.

Condiciones del sustrato:

La clave de un buen enlace recubrimiento-sustrato es la preparación de la superficie del sustrato. El objetivo de la preparación superficial es proveer de una máxima adherencia al recubrimiento, la practica actual tiene un doble propósito. El primero es remover todo material extraño de la superficie del sustrato, así como eliminar costras con enlace químico, óxidos e imperfecciones. El segundo propósito es incrementar el área superficial por un aumento de la rugosidad y proveer puntos de anclaje que mejoran la adherencia y permiten aumentar el espesor del recubrimiento. Para eliminar grasas, aceites, óxidos, polvos y suciedad en general, se acude a diversos métodos físicos, químicos y mecánicos tales como limpieza por solventes, agentes limpiadores alcalinos, decapado ácido, flameado, cepillado manual o mecánico, granallado, etc. La elección del método adecuado depende del estado inicial de la superficie que se va a acondicionar, pero en general se debe obtener una superficie a metal blanco rugosa y totalmente limpia. El método usual para lograr una preparación apta para la metalización es el chorreado, si éste se realiza con perdigones(shot-blasting) la superficie queda relativamente suave con pequeños perfiles, en cambio si se realiza con arena (sand-blasting) o granalla angular afilada (grit-blasting) el metal quedara rugoso, con altos desniveles pico/valle. Actualmente el método más recomendado es el uso de granalla. En general el termorrociado se debe realizar máximo una hora después de realizada la preparación superficial y deberá evitarse un precalentamiento excesivo del sustrato. El precalentamiento es benéfico para reducir los esfuerzos residuales siempre y cuando no degrade las propiedades del sustrato o lo oxide. Normalmente la temperatura de precalentamiento del sustrato debe de ser de 120 a 200°C.

Otras variables:

El ángulo de rociado, se recomienda un rociado normal a la superficie del sustrato, las desviaciones a esta consideración incrementa la porosidad del recubrimiento y disminuirá la eficiencia de deposito. Otra consideración importante es la distancia de rociado, debido a que se puede inducir la oxidación, pérdida de energía cinética y temperatura de la partícula al momento del impacto sobre el sustrato.

CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS DE UN RECUBRIMIENTO PROTECTOR [4]:

La selección de un recubrimiento protector no es fácil, para ello es necesario conocer su comportamiento en el ambiente de servicio. Obviamente la pérdida del recubrimiento puede ocasionar ataque catastrófico del sustrato, por eso la razón principal de aplicar un recubrimiento protector a un componente sujeto a ambientes agresivos y altas temperaturas, es asegurar que el componente sea capaz de operar eficientemente durante su vida de diseño.

De manera similar, el desarrollo de un recubrimiento es más complicado, ya que además de que debe ser resistente en el ambiente de servicio, es necesario que reúna características tales como: resistencia a la erosión / impacto, estabilidad térmica, resistencia a esfuerzos mecánicos, adhesión, no afectar las propiedades de la aleación base, ni las funciones del componente, entre otras.

Los recubrimientos protectores alargan la vida útil de los componentes, a este respecto debe señalarse que el recubrimiento sólo retrasa el inicio de la corrosión. Esto se logra reduciendo la velocidad de corrosión de la superficie del componente recubierto. Además, es imposible prevenir que partículas de diferentes tamaños golpeen la superficie recubierta, el recubrimiento puede ser completamente destruido por este proceso, por eso es necesario que tenga resistencia a este tipo de daño. Los recubrimientos dúctiles son más ventajosos en este respecto, debido a que un impacto los deformaría pero no los destruiría. De igual manera, el recubrimiento debe ser estable bajo cualquier condición de servicio, con el fin de que los elementos responsables de la resistencia a la corrosión permanezcan en el recubrimiento y no se pierdan por difusión de éstos hacia el metal base. Tal difusión puede tener un efecto perjudicial sobre las propiedades mecánicas del metal base.

Los recubrimientos deben ser capaces de soportar toda clase de esfuerzos que ocurren sobre la superficie del componente durante el servicio. Es importante que el recubrimiento y metal base posean coeficientes de expansión térmica similares para minimizar los riesgos de daño por fatiga térmica en el recubrimiento durante los procedimientos de arranques y paros. Los recubrimientos deben estar ligados al metal base para que ni los esfuerzos térmicos ni mecánicos causen su desprendimiento. La experiencia muestra que generalmente sólo los recubrimientos unidos al metal base por difusión pueden reunir este requisito. Para los recubrimientos tipo sobre capa este requisito se aplica a cada capa. El recubrimiento no debe cambiar la forma del componente ni su comportamiento aerodinámico.

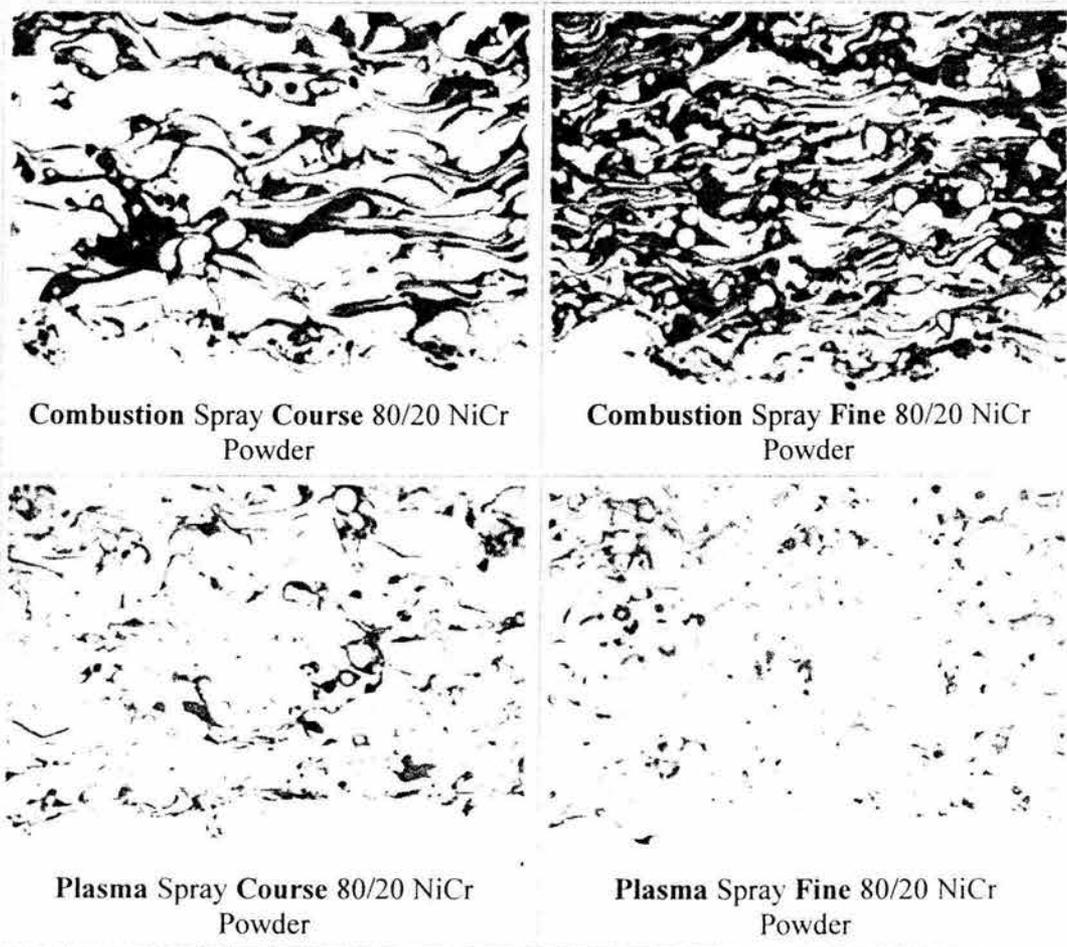
Propiedades requeridas en sistemas de recubrimientos resistentes a la corrosión [4]:

Propiedad	Requerimientos
Resistencia a la corrosión y oxidación	<ul style="list-style-type: none">- Formación inicial rápida de una película delgada de óxido uniforme, adherente y protector.- Baja velocidad de crecimiento del óxido.- Capa altamente estable y adherente.- Alta concentración de los elementos que forman la capa.- Velocidad de corrosión-oxidación aceptable.
Estabilidad interfacial del recubrimiento y aleación	<ul style="list-style-type: none">- Baja velocidad de difusión a través de la interfase.- Cambios mínimos de composición.
Adhesión del recubrimiento	<ul style="list-style-type: none">- Propiedades similares del sustrato y recubrimiento.
Propiedades Mecánicas	<ul style="list-style-type: none">- Resistencia a ciclos térmicos.- Ductibilidad adecuada del recubrimiento.- Efectos mínimos sobre las propiedades del sustrato.
Propiedades Aerodinámicas	<ul style="list-style-type: none">- Acabado superficial aceptable.- Espesor y uniformidad.- Pérdidas mínimas durante el servicio.
Proceso de aplicación	<ul style="list-style-type: none">- Habilidad para recubrir formas complejas.- Optimizado para obtener un recubrimiento uniforme en composición, estructura, espesor y distribución del espesor.- Costo aceptable.

ANEXO 2:

MICROESTRUCTURAS DE DIFERENTES MATERIALES OBTENIDAS POR LOS DIVERSOS MÉTODOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA [IV].

Thermal Spray Coating Metallography Effect of Process and Powder Size



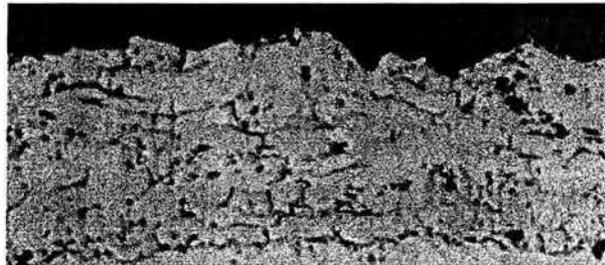
En las fotografías se pueden observar las diferencias microestructurales de los procesos de proyección térmica por Plasma y por Combustión de polvos.

El rociado por Plasma generalmente es más fino y denso con menor cantidad de inclusiones de óxidos, ocasionadas por poseer mayor velocidad de proyección de partículas comparado con el proceso de combustión de polvos.

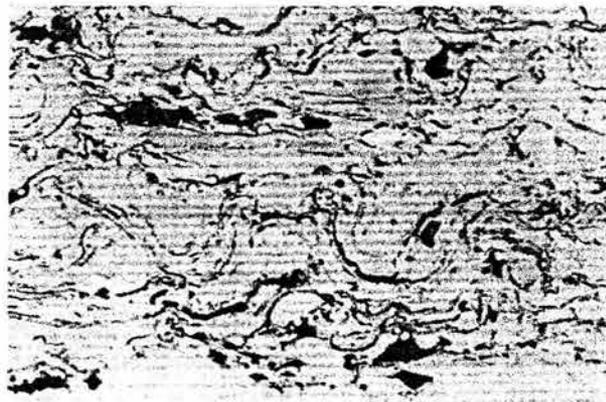
*Metal Spray Coating Photomicrographs
Combustion Wire Process*



Combustion Wire Sprayed 13Cr Steel Coating

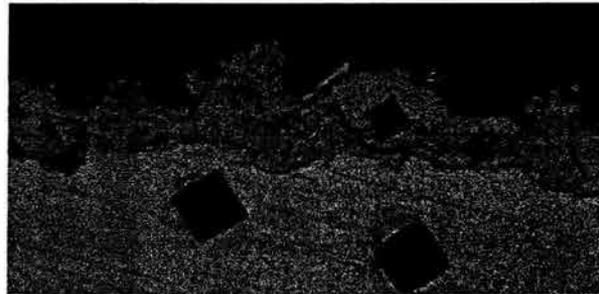


Combustion Wire Sprayed Molybdenum Coating

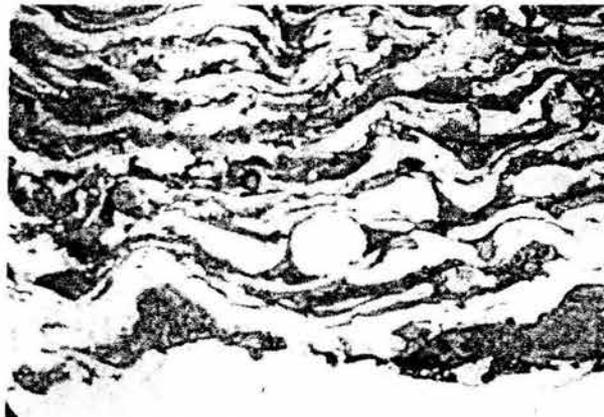


Combustion Wire Sprayed Nickel Coating

*Thermal Spray Coating Photomicrographs
Arc Spray Coatings*



Arc Wire Sprayed 13Cr Steel Coating on Aluminium Substrate.
Coating designed to give gripping surface to rubber.
Note Vickers Microhardness indentations in substrate and coating.

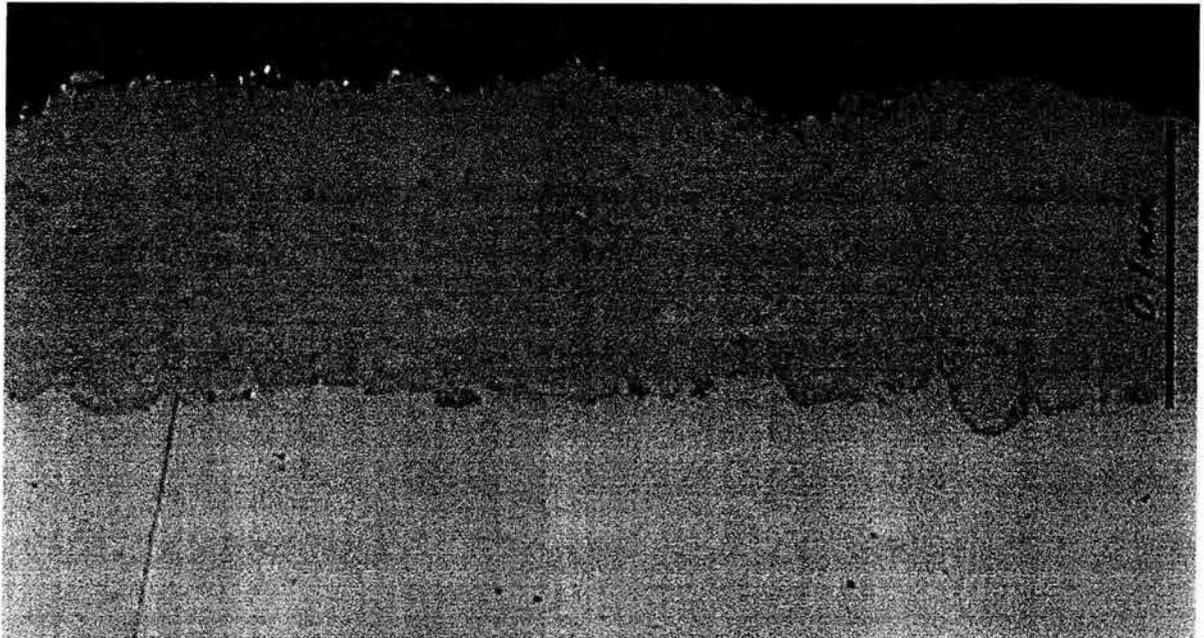


Arc Wire Sprayed 13Cr Steel/Aluminium bronze Pseudo-alloy Coating
Made possible by feeding two different wires into the arc.

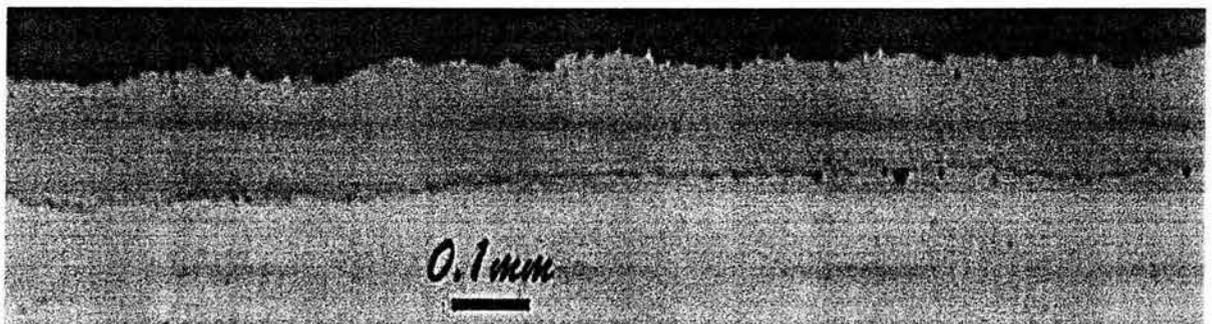


Arc Wire Sprayed Nickel Aluminium Alloy Coating

**Thermal Spray Coating Photomicrographs
HVOF Spray Tungsten Carbide / Chromium Nickel Coating**

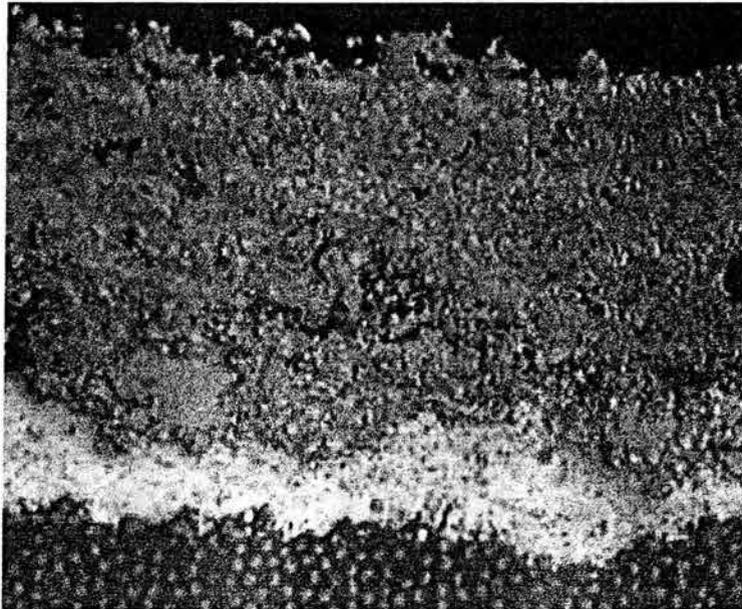


HVOF sprayed Tungsten Carbide / Chromium Nickel Coating (WC/20Cr7Ni)

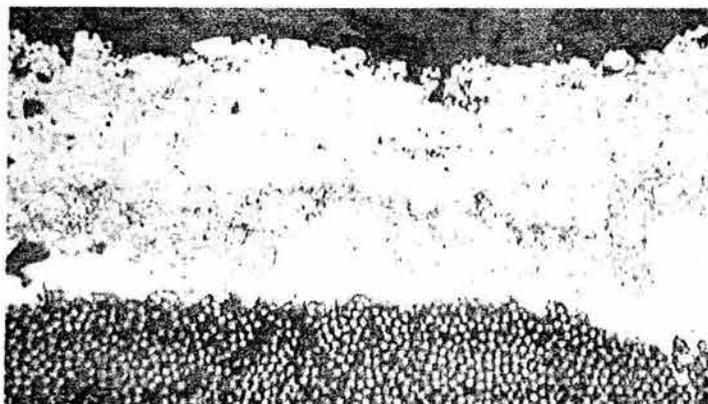


HVOF sprayed Tungsten Carbide / Chromium Nickel Coating (WC/20Cr7Ni)

Thermal Spray Coating Photomicrographs
Plasma Spray Tungsten Carbide / Cobalt Chromium Coating on Carbon Fibre
Reinforced Polymer Composite Substrate



Plasma sprayed Tungsten Carbide / Cobalt Chromium Coating on Carbon Fibre Reinforced Polymer Substrate



Plasma Sprayed Tungsten Carbide / Cobalt Chromium Coating on Carbon Fibre Reinforced Polymer Substrate

BIBLIOGRAFÍA.

- 1) Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Asociación Ciencia Hoy.
Volumen 9- N°49 Noviembre/Diciembre 1998
Ciencia Hoy: 49 Artículos
La Ciencia y la ingeniería de los biomateriales, un desafío interdisciplinario
Autor: Gustavo A. Abraham, Maria Fernanda González y Teresita R. Cuadrado.
Del Instituto de investigaciones en Ciencias y Tecnología de Materiales
(INTEMA)
Universidad Nacional de Mar del Plata. CONICET
- 2) Plásticos Industriales “Teoría y Aplicaciones”
Autor: Terry L. Richardson y Erik Lokensgard
Tercera Edición
Editorial: Delmar Publishers Inc
- 3) The Science and engineering of thermal spray coatings
Autor: Lech Pawlowski
Editorial: John Wiley & Sons
(Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore)
- 4) Protección contra corrosión a alta temperatura por medio de recubrimientos base silicio aplicados por proyección térmica.
Autor: J. Porcayo – Calderón.
Facultad de Química UNAM (1998)
- 5) El plástico en la industria.
Volumen 1, 2: Inyección de plásticos.
Autor: W. Mink.
GG/México.
- 6) El plástico en la industria.
Volumen 3: Moldes para inyección.
Autor: G. Mengues / G. Mohren
GG/México.
- 7) Moldes para inyección de plásticos.
Autor: Dr. Ing. G. Menges.
Dr. Ing. G. Mohren.
Editorial: Gustavo Gili, S.A.
- 8) Soldadura
Aplicaciones y Practica
Autor: Horwitz
Editorial: Alfaomega.

Direcciones de Internet:

I	http://www.aprepet.org.mx.2001
II	http://www.sulzermetco.com/eprice/sulzer/sities/main.htm
III	http://www.sulzermetco.com
IV	http://www.gordonengland.co.uk/pmg13.htm
V	http://prof.usb.ve/hreveren/Termo.htm
VI	http://www.metalizacionesindustriales.com.mx
VII	http://www.ametekmetals.com/spanish/mp-thermal.htm
VIII	http://www.drexel.com.mx/sulzer.htm
IX	http://www.flamesprayinc.com/process.htm
X	http://www.ametek84.com/metalpowders.asp
XI	http://www.metalize.com/concrete.html
XII	http://www.ellisonsurfacetech.com/recommendations.htm
XIII	http://www.aacoinc.com/table.htm
XIV	http://www.magnaplate.com/newlit/
XV	http://www.cccoat.com/teflon1.html
XVI	http://www.godfreywing.com/services/adseal.htm
XVII	http://www.sandmasters.com
XVIII	http://213.96.78.235/web/habitat/recubrimiento.htm