

2.3.1.1.2 Parámetros

Algunos de los parámetros más importantes de la proyección térmica se comentan a continuación:

- Velocidad de proyección (velocidad de las gotas)

En general, cuanto mayor es la velocidad de incidencia de las partículas, mayor es la densidad, la cohesión e integridad del recubrimiento, y, por lo tanto, los recubrimientos obtenidos por HVOF y por detonación son los que ofrecen mayor resistencia al desgaste.

- Tamaño de las gotas

Evidentemente cuanto más pequeñas sean, mayor compactación tendrán, pero también hay que tener en cuenta que solidificarán antes, por lo tanto, no se puede proyectar a baja temperatura o a grandes distancias.

- Temperatura

El control de la temperatura durante la proyección es muy importante, mediante esta técnica tenemos la ventaja de que el sustrato no se calienta demasiado, por lo tanto, no sufre alteraciones térmicas.

Ahora, la temperatura de las partículas a proyectar es muy importante, ya que, a mayor temperatura en las partículas, mayor será la expansión que sufre, por lo tanto mayor la contracción al solidificarse, con los inconvenientes que esto conlleva.

- Espesor de capa

La proyección térmica tiene un rango de espesor bastante grande, desde las pocas μm hasta más o menos 500 μm . Se podrá depositar más o menos en función de las técnicas y parámetros escogidos.

- Distancia de proyección

Una vez la partícula sale de la pistola comienza a enfriarse y a solidificarse (desaceleración). No es convenientes distancias muy grandes

En algunos casos se puede realizar un refundido posterior a la proyección. Éste, consiste en calentar el recubrimiento mediante una llama, con la intención de: reducir las tensiones internas, reducir porosidad de los recubrimientos, aumentar la microdureza, incrementar la adherencia recubrimiento- sustrato y homogeneizar la microestructura del recubrimiento

2.3.1.1.3 Técnicas de la proyección térmica

Existen diferentes técnicas de proyección térmica, aquí solamente se presentarán las más importantes. Existen diversas maneras de clasificar estas técnicas, nosotros lo haremos atendiendo a la fuente de energía, como se puede ver en la figura 2.15 y 2.16.

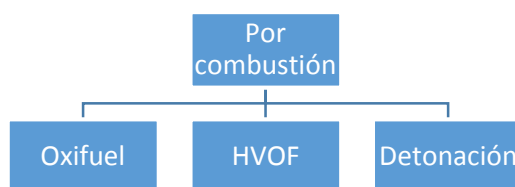


Figura 2.15 Por combustión

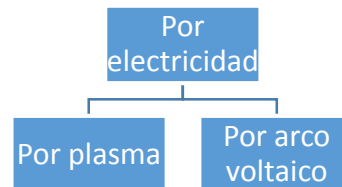


Figura 2.16 Por electricidad

Por combustión

Proyección térmica oxifuel

En la variante oxifuel tenemos una alimentación continua del material hacia la boquilla. Gracias a un combustible gaseoso, por ejemplo, acetileno o propano, se funde el material. Y luego con la ayuda de un gas atomizante, por ejemplo, aire comprimido o nitrógeno, se lanza hacia el sustrato.

El material puede estar en forma de polvo o hilo.



Figura 2.17. Esquema de proyección térmica oxifuel

Oxifuel de alta velocidad o HVOF (High Velocity Oxyfuel)

Es una variante de la técnica oxifuel, al principal diferencia es que la combustión en la variante oxifuel se produce en el aire, mientras que en la de HVOF se produce en el interior de una cámara a grandes presiones.

Utiliza oxígeno, y un gas combustible, normalmente, propano, propileno e hidrógeno. El material es inyectado dentro de la llama, y esta llama sale a gran velocidad. Gracias a las grandes velocidades de proyección se obtienen, recubrimientos muy densos, con gran adherencia y baja porosidad.

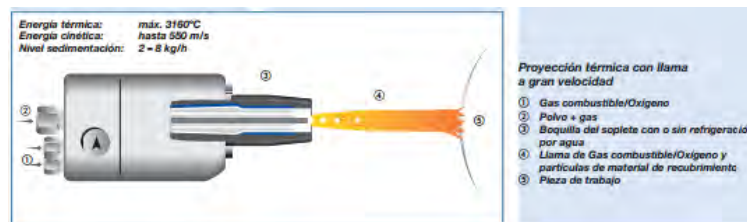


Figura 2.18. Esquema de proyección térmica oxifuelde alta velocidad

Detonación

En la cámara de combustión de esta variante tenemos, oxígeno, acetileno y el material en polvo, con una chispa se consigue la detonación, y la onda producida por esta producirá que las partículas salgan disparadas. Las detonaciones se producen varias veces por segundo.

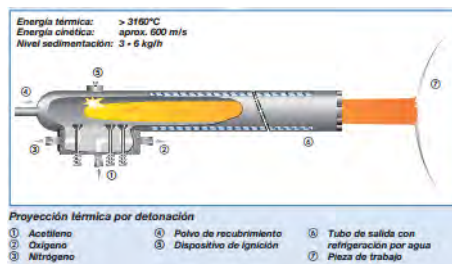


Figura 2.19. Esquema de proyección térmica por detonación

Electricidad

Por plasma

El rayo plasma es el encargado de fundir y proyectar el material, este se forma a partir de un arco voltaico, a través de argón, nitrógeno, hidrógeno o una mezcla de ellos.

Se forma un arco voltaico, el cual se encarga de conducir el rayo de plasma, que se encarga de fundir el material. El arco voltaico cede su energía térmica a las partículas que se proyectan.

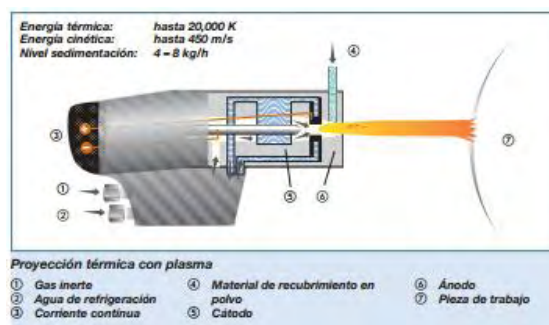


Figura 2.20. Esquema de proyección térmica por plasma

Por arco voltaico

Tenemos dos hilos que funcionan como arco voltaico, que se encargan de fundir el material. Con la ayuda de un gas pulverizador se dispara el material hacia el sustrato.

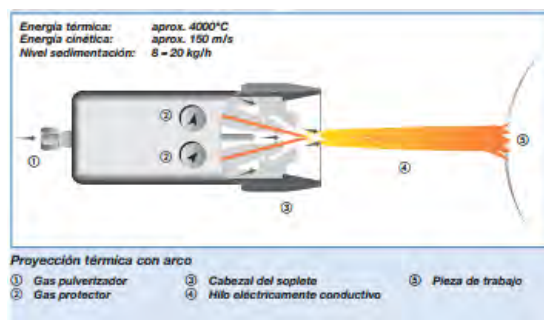


Figura 2.21. Esquema de proyección térmica por arco voltaico

2.3.1.2 Material a proyectar

Como se ha dicho anteriormente partiremos de una aleación comercial de base níquel, (NiCrBSi) a la que se añadirán pequeñas cantidades de Al_2O_3 y Zr_2O_3 . A continuación, se citaran las propiedades más importantes de cada una de ellos de manera individual.

NiCrBSi

Se trata de una aleación comercial de base níquel, con adición de cromo, boro y silicio. El porcentaje de cada compuesto varía depende de la aplicación para lo que vaya a ser usado, y en nuestro caso, tendrá una composición como se ve en la tabla 2.1.

Ni	Cr	B	Si
83 %	10%	3.5%	3.5%

Tabla 2.1 .Composición NiCrBSi

Cada componente en la aleación aporta unas características distintas:

Ni → mejora de ciertas propiedades como, mayor resistencia a oxidación.

Cr → resistencia a la oxidación y a la corrosión de alta temperatura y aumenta la dureza. Resistencia a la abrasión.

B → reduce la temperatura de fusión. Y ayuda en la formación de fases duras. Resistencia a la abrasión.

Si → aumenta las propiedades autofundentes.

La aleación, tiene como características más importantes: la resistencia al desgaste y la capacidad para soportar ambientes corrosivos a altas temperaturas

También tiene propiedades autofundentes, por lo que es muy apropiada para la proyección térmica.

Al_2O_3 y Zr_2O_3

Lo que queremos agregar al material base son dos cerámicas, se conocen como “cerámicas modernas” y se incluyen dentro de óxidos cerámicos. Tanto la alúmina, como la zirconia, tienen algunas características en común.

Algunas de sus características, que derivan de sus enlaces

- Estabilidad química
- Barrera térmica y eléctrica

Como propiedades mecánicas importantes tenemos

- Elevada rigidez
- Elevado límite elástico
- Ductilidad prácticamente nula
- Puntos de fusión altos
- Bajos coeficientes de expansión térmica → pequeñas dilataciones

Como desventaja de las cerámicas tenemos que son altamente frágiles.

Óxido de aluminio (Al_2O_3)

También llamada alúmina. Se trata de un material cerámico. Se encuentra de forma natural en forma de corindón o esmeril, y en la industria se obtiene a partir de la bauxita.

En la siguiente tabla se pueden ver las propiedades más importantes de la alúmina

Densidad (g/cm^3)	Temp. de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	Dureza Vickers (HV)	Módulo elástico (MPa)
3,8	2050	2200	345000

Tabla 2.2. Propiedades de la alúmina

Óxido de zirconio (Zr_2O_3)

También llamado zirconia.

Las propiedades más importantes se muestran en la siguiente tabla.

Densidad (g/cm^3)	Temp. de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	Dureza Vickers (HV)	Módulo elástico (MPa)
5,7 - 6,1	2680	2500	205000

Tabla 2.3. Propiedades de la zirconia

3. Normas y referencias

3.1 Normas aplicadas

UNE 157001. Criterios generales para la elaboración de proyectos. Febrero 2002

UNE 50-132-94 Numeración de las divisiones y subdivisiones en los documentos escritos. Enero 1994

UNE-EN ISO 3098-0 Documentación técnica de productos. Escritura. Requisitos generales. Julio 2008

UNE-EN ISO 3098-2 Documentación técnica de productos. Escritura. Parte2: Alfabeto latino, números y signos. Enero 2001

UNE-EN ISO 20-653-82 Limpieza por ultrasonidos. Consideraciones generales. Octubre 1982

UNE – EN 14616. Proyección térmica. Recomendaciones proyección térmica. Febrero 2006

UNE – EN ISO 15520. Proyección térmica. Recomendaciones para diseño de conjunto de elementos de recubrimientos por proyección térmica. Septiembre 2008

UNE 1-032-82 ISO 128. Dibujos técnicos. Principio generales de representación. Diciembre 1962

UNE 1-039-94 Dibujos técnicos. Acotación. Diciembre 1994

UNE-EN ISO 5455. Dibujos técnicos. Escalas

3.2 Bibliografía

1. Ferrer Giménez, C. y Amigó Borrás, V. (2011). *Tecnología de materiales*. Valencia: Universidad politécnica de Valencia.
2. Sarkar A.D. (1990). *Desgaste de metales*. México: Editorial Limusa S.A.
3. Vázquez, A.J. y De Damborenea, J.J. (2001) *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos*. Madrid: Csic
4. William D. Callister, Jr. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté.
5. William E. Smith y Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México: Mc Graw Hill

4. Definiciones y abreviaturas

A continuación indican las abreviaturas, con su significado. Ordenadas según aparecen en el proyecto.

Ni → níquel

Cr → cromo

B → boro

Si → silicio

esq. → esquema

HVOF (High Velocity oxyfuel) → oxifuel de alta velocidad

µm → micras

g → gramos

cm³ → Centímetro cúbico

MPa → Mega pascales

mm → milímetros

rpm → revoluciones por minuto

N → newton

m → metro

€ → euros

h → horas

IVA → Impuesto sobre el valor añadido

5. Requisitos de diseño de los moldes

5.1 Recomendaciones de geometrías

En general, la proyección térmica no presenta problemas a la hora de tamaños y formas, pero si que es verdad que hay que tener cuidado con ciertas geometrías de las superficies a proyectar. En las normas UNE-EN ISO 14616 y UNE-EN ISO 15520 se citan algunas de las recomendaciones que hay que considerar previamente a la proyección.

- Las esquinas deben de ser redondeadas. Ya que las esquinas puntiagudas, actúan como concentrador de tensiones. Además la adherencia es peor, y se concentran más poros en estos puntos.



Figura 5.1. Recomendación. Redondeo de esquinas

- Relacionado con el punto anterior, cuando se mecaniza una parte para proyectar posteriormente, se deben también redondear o hacer un pequeño chaflán.

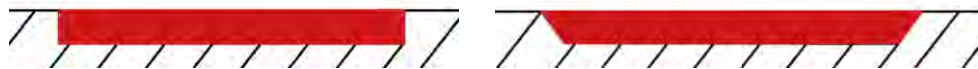


Figura 5.2. Recomendación. Realizar chaflán

- La mejor posición para realizar la proyección es a 90° , aunque hasta un ángulo de 45° sería aceptable. Por lo tanto, en lo que respecta a la proyección de un molde no se podrán realizar zonas donde no sea accesible la pistola y se tenga que girar un ángulo muy distinto al recto.

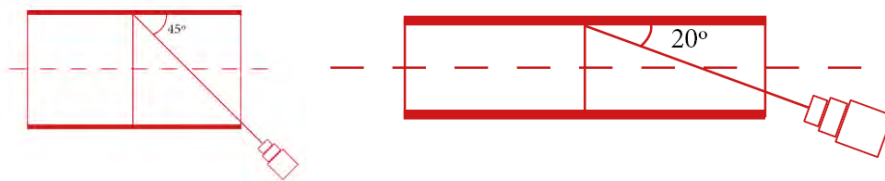


Figura 5.3. Recomendación. Ángulos de proyección

- También habrá que tener cuidado con las distancias, no se pueden proyectar en zonas donde no se puedan guardar la distancia necesaria para realizar la proyección.

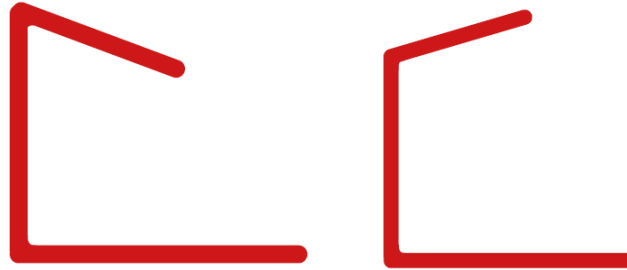


Figura 5.4. Recomendación. Distancias de la pistola

- También se tendrá cuidado con los agujeros y ranuras, estrechos y ciegos, ya que no se suelen recubrir bien.
- No se pueden hacer detalles muy pequeños ya que no será posible realizar la proyección

5.2 Proceso generalizado para la recuperación de moldes

Nuestra finalidad es recubrir las superficies de un molde. Nos podemos encontrar con dos situaciones diferentes: proyección de moldes nuevos o de moldes usados.

Recubrir nuevos: al recubrir un molde nuevo, conseguiremos que la vida útil del aumente, reduciendo así costes innecesarios, de cambio o recuperación.

Para los moldes nuevos el plan de actuación sería:

1. Mecanizar: rebajar la superficie, para poder proyectar. Se rebajará el espesor que se desee de capa de recubrimiento.
2. Preparar la superficie como se ha indicado en la parte experimental y proyectar el material. Se proyectará un poco más del espesor de capa deseado, para poder realizar el pulido posteriormente.

3. Pulir la superficie, ya que, para los moldes de inyección, los acabados de las superficies son muy importantes.

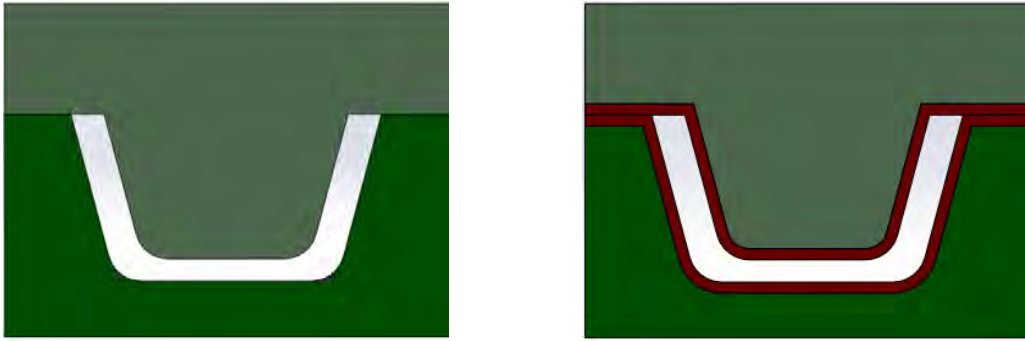


Figura 5.5. (a) Molde nuevo sin recubrimiento y (b) molde nuevo con el recubrimiento aplicado

Recubrir moldes usados: en este caso el objetivo es la recuperación de un molde. Es bastante más económico reparar un molde que reemplazarlo.

En función de los daños, será necesario un plan de actuación diferente, aquí se van a distinguir dos casos generales de defectos: los que tienen una superficie desgastada completa; y los que tienen defectos puntuales y muy localizados. En el primer caso se recubrirá entero, y en el segundo únicamente aquella parte dañada.

Desgastado en toda la superficie

Si tenemos un molde con bastantes defectos en la superficie, lo mejor es recubrir la superficie entera, para ello se seguirán los siguientes pasos:

1. Medir la profundidad de la grieta más grande.
2. Rebajar en todo el molde la medida de la grieta más grande.
3. Se realizará la proyección.
4. Pulir la superficie.

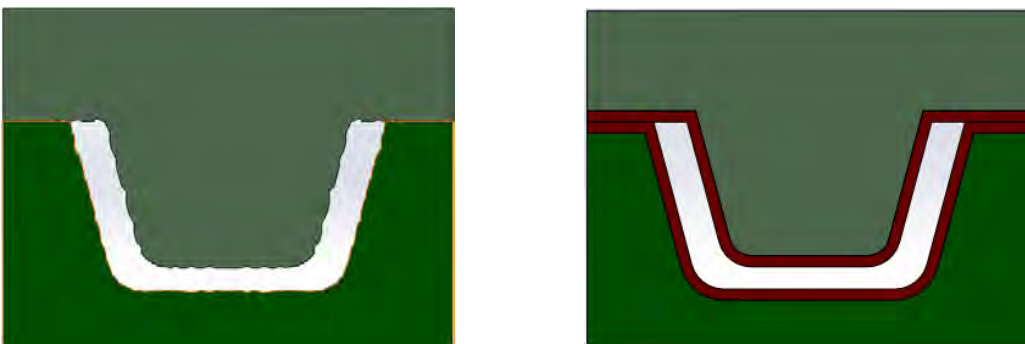


Figura 5.6. (a) Molde con un desgaste en toda la superficie y (b) molde después de recuperarlo

Molde con defecto puntual

En este caso tenemos algún defecto puntual y localizable, para este tipo lo que haremos será, únicamente mecanizar esta parte y aplicarle el recubrimiento.

1. Mecanizar, únicamente en la parte del defecto
2. Preparar la superficie y proyectar.
3. Pulir

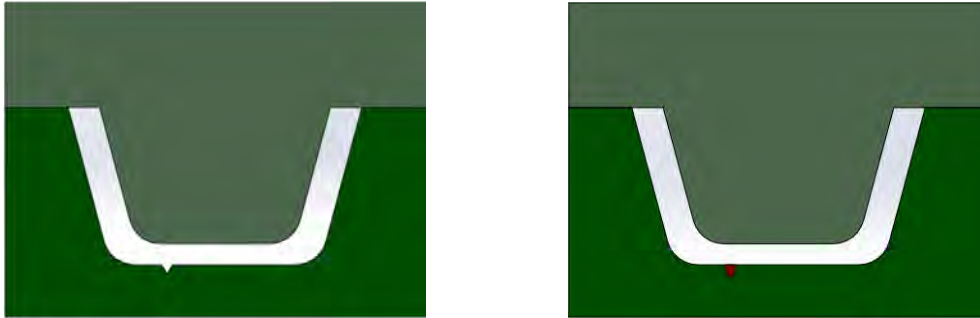


Figura 5.7. (a) Molde con un defecto puntual y (b) molde con defecto ya recuperado

Será necesario enmascarar aquellas partes que no se deseen recubrir. Lo haremos conforme la norma UNE-EN ISO 13507. Se protegerán mediante máscaras. Para ello podremos utilizar: cintas autoadhesivas, madera dura, caucho, goma de silicona o máscaras metálicas. Se tomarán precauciones para asegurar que el material de la máscara no contamina en ningún momento la superficie a proyectar.

6. Planificación

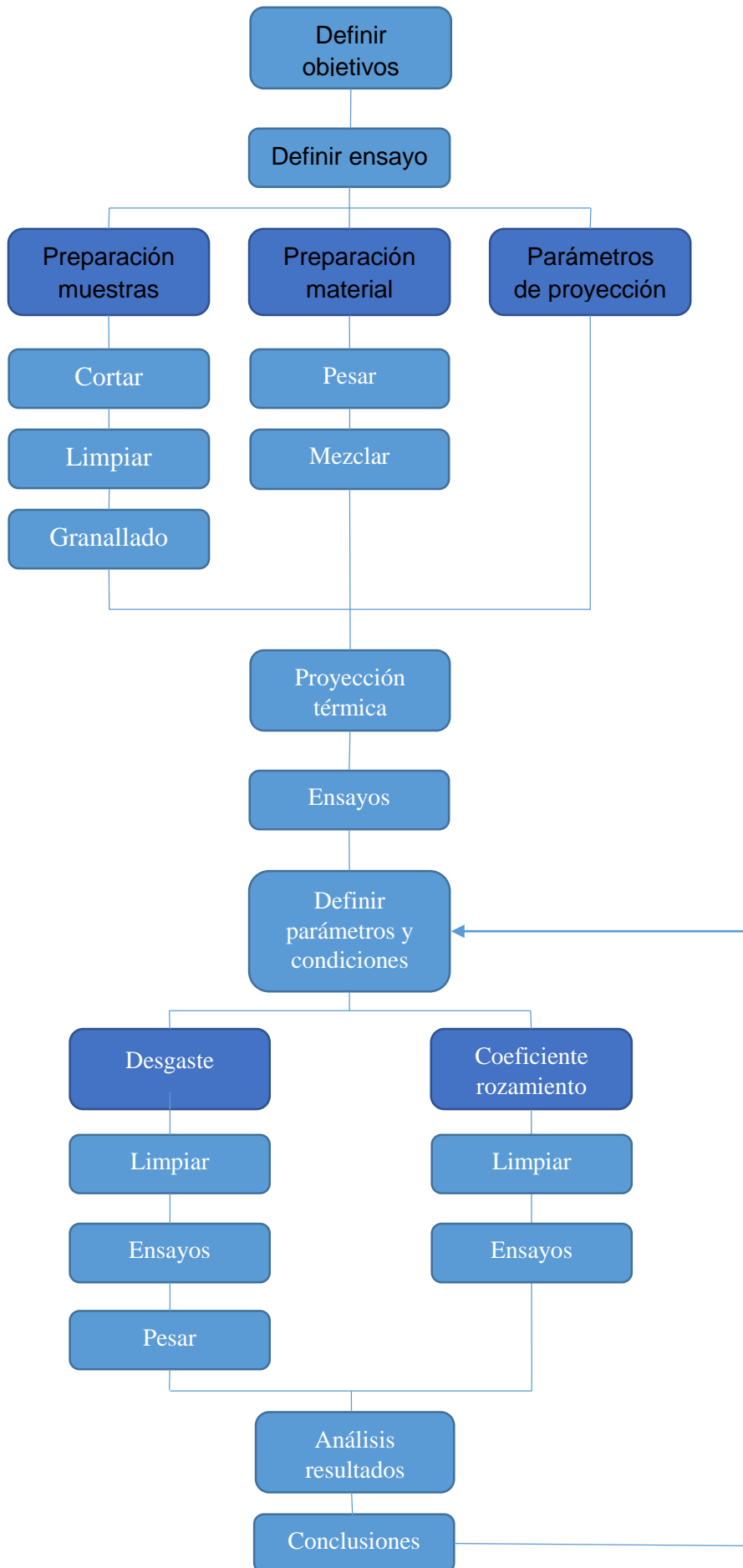
Para garantizar la finalización del proyecto en los plazos que se tienen, se planifican las tareas a realizar, en el tiempo disponible.

Se establecerá un plan de trabajo, organizado mediante una tabla (tabla 6.1) donde, en primer lugar se tendrá una lista con las tareas más importantes. Marcaremos las fechas de inicio y fin, así como los hitos del proyecto.

Después mediante un diagrama (figura 6.1) se indicará el orden lógico de la realización de los ensayos.

	Tarea	Fecha inicio	Fecha fin	Hito
1	Búsqueda de información	09/12/2013	31/01/2014	
2	Aprender funcionamiento de las máquinas	03/01/2014	05/01/2014	
3	Ensayos laboratorio	05/01/2014	18/03/2014	SÍ
4	Evaluar resultados. Gráficas	18/03/2014	02/04/2014	
5	Revisión final del proyecto	07/07/2014		SÍ
6	Presentación del proyecto	10/07/2014		Sí

Tabla 6.1. Lista de tareas con fechas previstas



7. Parte experimental

A continuación, se describirán los pasos realizados para llevar a cabo los ensayos en el laboratorio. Una de las principales dificultades a la que nos enfrentamos al hacer los ensayos en el laboratorio, es el conseguir las mismas condiciones que en el entorno real de desgaste. Se intentará mediante los siguientes pasos simular lo más parecido posible, el entorno real. Para que los resultados sean lo más fiable posible.

Dentro de la parte experimental de nuestro proyecto tenemos tres partes bien diferenciadas

- Preparación de las muestras.
- Aplicación del recubrimiento.
- Los ensayos en el tribómetro.

Preparación de las muestras

La preparación de las muestras es muy importante, tanto la geometría, como las superficies juegan un papel muy importante en la calidad del recubrimiento.

Cortar los pins

En primer lugar, para obtener las muestras, se cortará una barra de Acero Inoxidable AISI 304 de 8 mm de diámetro, en trozos de 17 mm de longitud. Se cortará mediante una tronzadora industrial (Figura 7.1), con una muela de abrasivos, para no sufra deformaciones ni adquiera dureza por acritud. La máquina utiliza taladrina, que es un producto compuesto por agua y aceites que se utiliza como lubricante y refrigerante.



Figura 7.1. Tronzadora de disco abrasivo Abrasimet 2

Desbaste

Seguidamente, se quitan las rebabas y se matan los cantos de las muestras, para conseguir que el recubrimiento se adhiera uniformemente en todas las zonas. Se hará mediante con una debastadora (Figura 7.2), que posee un disco abrasivo con una granulometría de 240 granos/mm²



Figura 7.2. Debastadora Metaserv 2000

Limpieza con ultrasonidos

Es muy importante la limpieza de la superficie, para la perfecta adherencia del recubrimiento, por ello las limpiaremos con ultrasonidos. Ponemos las piezas en acetona e introducimos el bote en la máquina de limpieza por ultrasonidos. La máquina (Figura 7.3) se encarga de generar las ondas ultrasónicas las cuales se propagan por la solución. Durante la fase de baja presión se producen pequeñas burbujas que más tarde, durante la fase de alta presión estallan produciendo así la limpieza superficial.



Figura 7.3. Limpiadora mediante ultrasonidos Branson 2210

Preparar material a proyectar

Luego, se preparan las mezclas de los polvos de material, para conseguir las aleaciones deseadas, los materiales de los que se disponen son:

- NiCrBSi: Eutalloy RW Powder. PE 3307 → Castolin
- Al₂O₃: Praxair
- Zr₂O₃: Praxair

Partiremos de la aleación comercial de base níquel, NiCrBSi, cuya composición es la que vemos en la tabla 7.1. A esta aleación se le añadirán diferentes porcentajes de alúmina y de zirconia, cuyo porcentaje en peso se ve en la tabla 7.2. Finalmente, se nos quedan 5 materiales para el estudio:

Ni	Cr	B	Si
83 %	10%	3.5%	3.5%

Tabla 7.1. Composición NiCrBSi

Muestra	Cantidad NiCrBSi (g)	Cantidad Al ₂ O ₃ (g)	Cantidad Zr ₂ O ₃ (g)
1. NiCrBSi	100	-	-
2. NiCrBSi + 1% Al ₂ O ₃	99	1	-
3. NiCrBSi + 2% Al ₂ O ₃	98	2	-
4. NiCrBSi + 1% Zr ₂ O ₃	99	-	1
5. NiCrBSi + 2% Zr ₂ O ₃	98	-	2

Tabla 7.2. Porcentaje en peso de cada material

Se pesará el polvo necesario para cada material, con la ayuda de una báscula de precisión. Y se lleva a una mezcladora por centrifugado (Figura 7.4), la cual se encargará de mezclar de forma homogénea los materiales.



Figura 7.4. Mezcladora por centrifugado Mixyvac

Granallado

Se granallan las muestras con una chorreadora (Imagen X), esta máquina mediante aire comprimido lanza una gran cantidad de partículas de corindón (alúmina). El fin de esta operación es conseguir una superficie rugosa para la perfecta adherencia del recubrimiento, ya que tiene un anclaje mecánico. La máquina utilizada es la Chorreadora Mega. Sistema seco

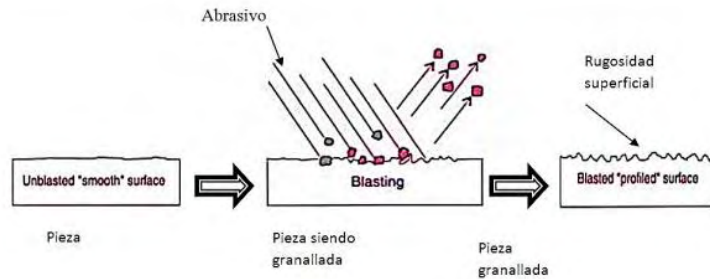


Figura 7.5. Esquema del proceso de granallado



Figura 7.6. Chorreadora MEGA 4

Limpieza

Después del granallado se vuelve a hacer una limpieza de ultrasonidos. Se procederá del mismo modo que se ha hecho anteriormente.

Aplicación de recubrimiento

Proyección térmica

A continuación, se aplicará el recubrimiento mediante proyección térmica y como se ha dicho anteriormente, utilizaremos la variante oxifuel, para ello utilizaremos la pistola Castodyn eutectic DS8000 y con una boquilla de 20SM (Figura 7.7 y 7.8)

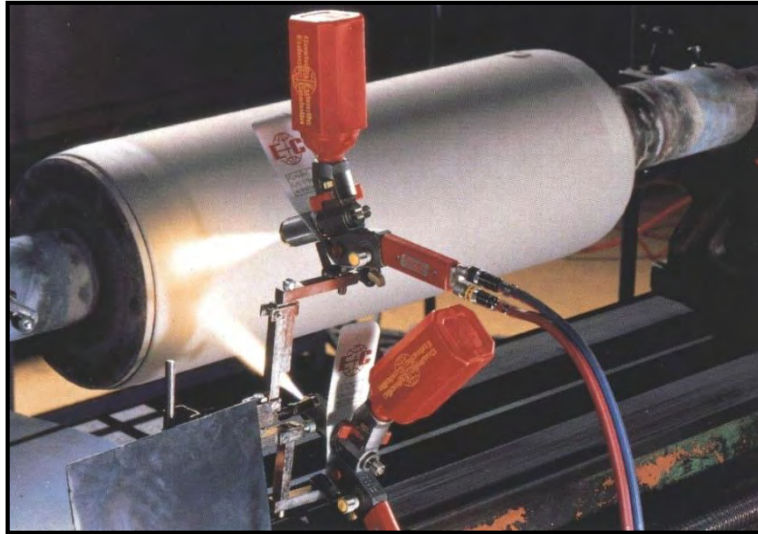


Figura 7.7. Pistola de proyección térmica, Castodyn eutectic DS8000

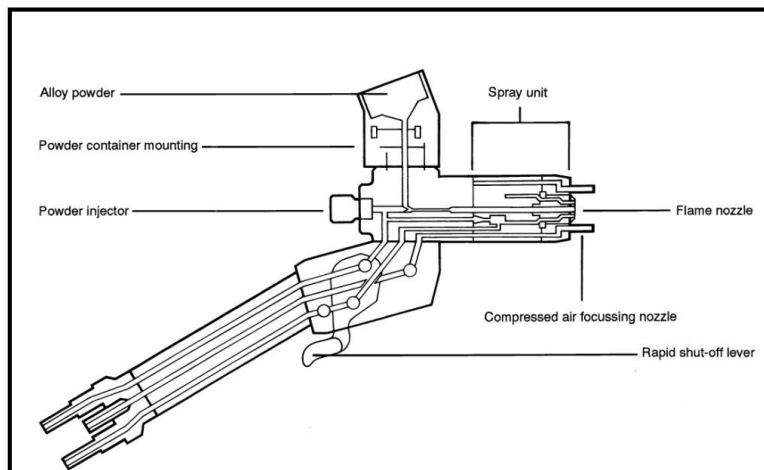


Imagen 7.8. Esquema de la pistola Castodyn DS8000