



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**TERMOROCIADO EN FRÍO PARA MANTENIMIENTO
CORRECTIVO Y PREVENTIVO DE PIEZAS SOMETIDAS A
DESGASTES**

Héctor René Porras Mirón
Asesorado por el Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta

Guatemala, septiembre de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TERMOROCIADO EN FRÍO PARA MANTENIMIENTO
CORRECTIVO Y PREVENTIVO DE PIEZAS SOMETIDAS A
DESGASTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

HÉCTOR RENÉ PORRAS MIRÓN

ASESORADO POR EL ING. FREDY MAURICIO MONROY PERALTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACTULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Eric René Guerrero Silva
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

TERMOROCIADO EN FRÍO PARA MANTENIMIENTO CORRECTIVO Y PREVENTIVO DE PIEZAS SOMETIDAS A DESGASTES,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 16 de julio de 2007.

Héctor René Porras Mirón

Guatemala, 20 de julio de 2007

Ingeniero
Fredy Mauricio Monroy Peralta
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Señor Director:

Tengo el agrado de notificar que he revisado el Trabajo de Graduación titulado: TERMOROCIADO EN FRÍO PARA MANTENIMIENTO CORRECTIVO Y PREVENTIVO DE PIEZAS SOMETIDAS A DESGASTES, realizado por el estudiante universitario Héctor René Porrás Mirón, Carné 99-11526.

A mi parecer, luego de realizadas las correcciones pertinentes, dicha investigación cumple con los requerimientos, alcanzando los objetivos planteados en el protocolo y en el trabajo mismo, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

Ing. Mecánico Fredy Mauricio Monroy Peralta
Colegiado: 4899

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS Y LA VIRGEN MARÍA

Por darme unos padres, familia y amigos maravillosos los cuales siempre me han estado apoyando; y por nunca dejarme solo

MIS PADRES

Carlos René y Marina Candelaria

MIS HERMANOS Y CUÑADOS

Juan Carlos
Claudia Elizabeth
Martha Lidia
Alba Carrillo
Julio Rodas
Edson Zurita

MI FAMILIA

Abuelos, tíos, primos, sobrinas, en especial a Alexis, Anthony y Priscila con quienes he compartido mucho, para que luchen por sus metas, que Dios los bendiga

AMIGOS

A todos en especial por compartir buenos momentos, en especial a mi novia Heidi Estrada y a Giovanni Torres por su asesoría y enseñanzas

LA USAC

La Facultad de Ingeniería y sus catedráticos

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA DE MANTENIMIENTO	1
1.1 Soldadura de producción	1
1.2 Soldadura de mantenimiento	3
1.3 Desarrollo de las aleaciones para mantenimiento	5
1.4 Análisis de inventarios	5
2. MECANISMOS DE DESGASTE	9
2.1 Abrasión	10
2.1.1 Abrasión pura o de bajo esfuerzo	11
2.1.2 Abrasión de alto esfuerzo	11
2.1.3 Abrasión por desgarramiento	12
2.2 Impacto	13
2.3 Fricción	15
2.4 Corrosión	17
2.4.1 Corrosión por oxidación	18
2.4.2 Corrosión electroquímica	19
2.5 Calor	23
2.6 Erosión	24
2.7 Cavitación	27

3.	RECUBRIMIENTOS PROTECTORES, SISTEMAS Y PROCESOS PARA SU APLICACIÓN	29
3.1	Clasificación de procesos en función del mecanismo de liga con el metal base	30
3.2	Descripción de procesos de soldadura	31
3.2.1	Arco eléctrico	31
3.2.2	Por fusión oxigas	35
3.2.3	Proceso de aplicación de recubrimientos protectores sin fusión del metal base (proceso de termorociado en frío)	37
3.2.4	Compuestos metálico orgánicos	40
4.	LA TECNOLOGÍA DEL TERMOROCIADO	43
4.1	Historia	43
4.2	Definición	43
4.2.1	Usos y ventajas	45
4.2.2	Limitaciones	45
4.3	Naturaleza de los revestimientos termorociados	45
4.4	Variaciones del proceso de termorociado	47
4.4.1	Fuentes de energía	47
4.4.1.1	Combustión	47
4.4.1.2	Eléctrica	48
4.4.1.2.1	Arco	49
4.4.1.2.2	Plasma transferido	49
4.4.1.2.3	Plasma no transferido	49
4.4.2	Materiales de aporte	49
4.5	Unidades de proyección	50
4.5.1	Equipos de combustión de baja velocidad	50
4.5.1.1	Equipos de aspersion y fusión a gas	52
4.5.1.2	Equipos de termorociado a gas de alambre	53

4.5.1.3	Equipos de termorociado a gas de varilla de cerámica	54
4.5.1.4	Equipos de termorociado a gas de polvo	56
4.5.2	Equipos de combustión de alta velocidad	58
4.5.2.1	Equipos de termorociado por detonación	58
4.5.2.2	Equipos de termorociado por combustión continua de alta velocidad	59
4.5.3	Equipos eléctricos	60
4.5.3.1	Equipos de termorociado por arco eléctrico	60
4.5.3.2	Equipos de termorociado por arco plasma	62
4.5.3.2.1	Equipos de termorociado por arco plasma transferido	63
4.5.3.2.2	Equipos de termorociado por arco plasma no transferido	64

5.	PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE TERMOROCIADO EN FRÍO	67
5.1	Preparación del área a recuperar	68
5.1.1	Limpieza	69
5.1.2	Mecanizado preliminar	70
5.1.3	Rugosidad superficial	71
5.1.3.1	Roscado basto	71
5.1.3.2	Rectificado	72
5.1.3.3	Chorro de granalla	73
5.2	Protección de zonas adyacentes	73

5.3	Aplicación de recubrimiento en polvo	75
5.3.1	Selección de parámetros para proyecciones en torno	75
5.3.2	Temperatura de precalentamiento	77
5.3.3	Temperatura de trabajo de la pieza	77
5.4	Acabado superficial de la pieza	77
5.5	Salud e higiene	79

6. COSTOS PARA UN PROCESO DE TERMOROCIADO EN

	FRÍO	81
6.1	Cálculo de área a recubrir	81
6.2	Cálculo de aleación requerida	85
6.3	Tiempo requerido	88
6.4	Consumo de gas	88
6.5	Cálculo de gastos por el depósito de la aleación	89
6.6	Costo total del trabajo	90
6.7	Ejercicio práctico para aplicación de costos de un proceso de termorociado en frío	90

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICE

ANEXOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagrama del proceso de soldadura de producción	2
2	Ángulo de incidencia de partículas abrasivas	10
3	Transporte de arena por medio de fajas de hule	11
4	Descripción del mecanismo de desgaste de abrasión de alto esfuerzo	12
5	Descripción del mecanismo de desgaste de abrasión por Desgarramiento	13
6	Descripción del mecanismo de desgaste por impacto	13
7	Mecanismo de desgaste de fricción	16
8	Relación entre profundidad de oxidación y la temperatura para varias composiciones químicas de metales	19
9	Descripción de la corrosión electroquímica	20
10	Descripción del mecanismo de desgaste por calor	23
11	Ángulos de incidencia de flujos que producen erosión	25
12	Ángulos de incidencia contra desgaste	26
13	Mecanismo de desgaste de cavitación	27
14	Procesos de arco eléctrico	32
15	Soldadura por fusión oxidas	35
16	Sistema de operación de un equipo de termorociado en Frío	38
17	Sección transversal de un recubrimiento por termorociado Típico	44
18	Diagrama de un sistema de termorociado	46

19	Esquema básico de un equipo de aspersión y fusión a gas	53
20	Esquema de un equipo de termorociado a gas de alambre	54
21	Equipo de termorociado a gas de varilla de cerámica	56
22	Equipo de termorociado a gas de polvo	57
23	Equipo de termorociado por detonación	59
24	Equipo de termorociado por combustión continua de alta Velocidad	60
25	Equipo de termorociado por arco eléctrico	61
26	Equipo de termorociado por plasma transferido	64
27	Equipo de termorociado de arco plasma no transferido	65
28	Velocidad de las partículas en los diferentes tipos de Termorociado	65
29	Superficie metálica real contaminada	70
30	Descripción del eje desgastado y perfil tras mecanizado de la zona desgastada	70
31	Vista de mecanizado de un eje cuando el desgaste se presenta en un extremo del mismo y vista después de aplicado el termorociado	71
32	Roscado basto	72
33	Rectificado con amoladora de disco	72
34	Equipo para chorreo de granalla	73
35	Aplicación de termorociado para una pieza plana	74
36	Aplicación de recubrimiento para piezas cilíndricas	75
37	Relación entre el diámetro de la pieza de trabajo y las velocidades de giro y avance	76
38	Corte de la pieza de trabajo para visualizar el maquinado al terminar la proyección de polvo	78
39	Pieza plana para cálculo de área a recubrir	81
40	Dimensiones de un cilindro a recubrir	84
41	Dimensiones de un cilindro a recubrir	86
42	Pre calentamiento de la pieza, antes del termorociado	103

43	Aplicación de termorociado en frío a un eje	104
44	Eje termorociado en frío	104
45	Vista final de un termorociado en frío	105
46	Termorociado en frío de un ventilador	105
47	Aplicación de termorociado utilizando aleación de bronce, en un eje tipo AISI 1045	106
48	Fallas comunes en aplicaciones de termorociado en frío	106
49	Medición de temperatura de un termorociado en frío	107
50	Acabado final de termorociado en frío utilizando aleación de bronce	107
51	Limpieza de una pieza a termorociar	108
52	Termorociado de una pieza plana	108
53	Termorociado con fusión de aleación (termorociado en caliente)	109

TABLAS

I	Mecanismos de liga con material base	31
II	Ventajas y desventajas en la utilización de los diversos sistemas de arco eléctrico	33
III	Composición nominal de la aleación, dureza, aplicaciones y características	36
IV	Aplicaciones características de aleaciones micropulverizadas para aplicaciones en frío	39
V	Resumen de las características de depósito y aplicaciones antidesgaste de los diversos procesos de recubrimiento	41
VI	Resumen de las características de depósito y aplicaciones antidesgaste de los diversos procesos de recubrimiento	42
VII	Características de aleaciones en polvo marca <i>Eutectic Castolin</i>	86
VIII	Características y propiedades de los procesos de termorociado	111
IX	Propiedades de las aleaciones	111
X	Vidrio con filtro recomendado para termorociado	112
XI	Características de procesos de termorociado	112
XII	Nivel de ruido máximo admisible por una persona en su jornada de trabajo	113
XIII	Tabla de propiedades de aleaciones para termorociado	113
XIV	Tabla de propiedades de aleaciones para termorociado	114
XV	Tabla de propiedades de aleaciones para termorociado	114

GLOSARIO

Aleación	Unión íntima y homogénea de dos o más elementos, siendo al menos uno de ellos un metal.
Ánodo	Electrodo positivo de una célula electrolítica, hacia el que se dirigen los iones negativos.
Austenita	Nombre dado a una estructura de acero en honor al investigador inglés <i>Austen</i> . Estructura de acero formada por carburo de hierro y solución sólida, con celda unitaria cúbica centrada en las caras.
Cátodo	Electrodo negativo de una célula electrolítica, hacia el que se dirigen los iones positivos.
Ductilidad	Propiedad que presentan algunos metales y aleaciones cuando, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sin romperse.
Elongación	Es el aumento de la longitud de un elemento al someterlo a una fuerza.
Energía	Capacidad de realizar un trabajo.
Hadfield	En honor al metalúrgico <i>Robert Hadfield</i> , quien descubrió la aleación de aceros al manganeso, aceros austeníticos.
Humedad	Cantidad de vapor de agua presente en el aire.

<i>Match</i>	Velocidad de propagación de las ondas sonoras.
Mecanismo	Conjunto de elementos rígidos, móviles unos respecto a otros y unidos entre sí.
Metalurgia	Ciencia y técnica de la obtención y tratamientos de los metales, desde minerales metálicos, incluyendo la producción de aleaciones.
Micra	Unidad de longitud equivalente a una millonésima parte de un metro.
Morfología	Es el estudio de la forma de un organismo o sistema.
Óxido	Compuesto químico que contiene uno o varios átomos de oxígeno.
Partícula	Cuerpo dotado de masa, del que se hace abstracción del tamaño y de la forma, pudiéndose considerar como un punto.
<i>Poisson</i>	En honor al físico <i>S. D. Poisson</i> , concepto que cuando se le aplica una fuerza a un material se producen deformaciones laterales comprendidas entre 0.25 y 0.35 de la deformación que se produce en sentido de la fuerza.
<i>Rockwell C</i>	Escala para medir durezas de materiales, avalado por la Asociación Americana de Ensayos y de Materiales.
Substrato	Pieza o superficie a recuperar.

LISTA DE ABREVIATURAS

%	Porcentaje
°	Grado
AC	Corriente alterna
AISI	Instituto Americano del Hierro y del Acero
Al	Aluminio
ASTM	Asociación Americana de Ensayos y de Materiales
B	Boro
BTU	Unidad de energía térmica inglesa
C	Carbono
Cl	Cloro
Cm	Centímetro
Cr	Cromo
Cu	Cobre
D	Diámetro
DC	Corriente directa
E	Energía
Fe	Hierro
H	Hidrógeno
ISO	Organización de Estándares Internacionales
Kg	Kilogramo
Lb	Libra
M	Masa
M	Metro
Mm	Milímetro
N	Velocidad angular expresada en revoluciones por minuto
Ni	Níquel

psi	Libras por pulgada cuadrada, unidad de presión
Pulg	Pulgada
Q	Quetzal, moneda guatemalteca
Seg	Segundo
Si	Silicio
T	Tiempo
Ti	Titanio
v	Velocidad lineal expresada en metros por minuto
W	Tungsteno
Zn	Zinc
Zr	Circonio

RESUMEN

Se tiene la idea de que la recuperación de piezas por medio del termorociado tiende a fallar o que tiene una alta probabilidad de no dar un cien por ciento de satisfacción. La falla en la mayoría de estos casos ha sido debido a que no se ha llevado un procedimiento adecuado para la aplicación del producto. Se debe de tener presente los puntos más importantes de la aplicación del termorociado en frío, para garantizar un buen trabajo, así como un análisis de costos para poder determinar el mejor procedimiento para la recuperación de una pieza desgastada. Por lo anterior es necesario un estudio para verificar el procedimiento correcto de un termorociado en frío así, como el costo del mismo.

Siguiendo estas recomendaciones se tendrá como resultado el aumento de la vida útil de las piezas claves en las industrias, lo cual conlleva a una reducción de piezas en las bodegas y los costos de éstas en las mismas.

Ha sido tal el éxito que ha tenido mundialmente el termorociado que lo vemos utilizar no solamente como mantenimiento correctivo, cuando una pieza se daña para poder recuperarla y ponerla nuevamente en funcionamiento, sino también como mantenimiento preventivo. Debido a la cantidad de aleaciones y revestimientos que se tienen a disposición, muchas industrias han optado por revestir o proteger ante desgastes que se conocen de las piezas originales, con lo cual se esta logrando un buen mantenimiento preventivo, esto trae un aumento muy grande de la vida útil de las piezas.

El presente trabajo incluye una descripción detallada de los conceptos y procedimientos para la aplicación de un termorociado en frío, la

descripción de los equipos de termorociado que actualmente existen en el mercado y un análisis de costos donde se describen todos los gastos que conlleva una reparación de este tipo. Finalmente se compara el costo del termorociado en frío con la compra de la pieza nueva.

OBJETIVOS

GENERAL

Integrar los conocimientos acerca de la técnica de termorociado en frío para que dé mayor eficiencia a los mantenimientos correctivo y preventivo de piezas sometidas a desgastes.

ESPECÍFICOS

1. Definir los distintos tipos de desgaste a los cuales está sometido un elemento mecánico.
2. Determinar la resistencia al desgaste de diversos tipos de aleaciones.
3. Identificar los procesos y sistemas para la aplicación del termorociado.
4. Describir el procedimiento de termorociado en frío, así como las técnicas y cuidados que se deben de tomar en cuenta a la hora de su aplicación.
5. Elaborar un ejercicio de costos que facilite la decisión entre reutilizar o cambiar.

INTRODUCCIÓN

Desde hace ya unos cinco a ocho años, como en las próximas décadas, una serie de metales al igual que el petróleo, comenzarán a escasear fuertemente y sus precios de venta en los respectivos mercados sufrirán fuertes alzas. Las economías, especialmente la de países en vías de desarrollo, tal es el caso de Guatemala, deben activar al máximo la búsqueda de soluciones que permitan enfrentar las futuras situaciones de escasez y alzas agudas de precios de los elementos necesarios para mantener sus industrias en actividad. Hacia el futuro próximo, la tecnología del re procesamiento o re-utilización, es decir, la tecnología de la conservación de recursos no renovables, adquiere una importancia muy alta para el efectivo desarrollo de los pueblos.

Hace unos años atrás la industria guatemalteca pasó por un período de gran abundancia, lo cual se podía determinar con tan sólo dar una mirada a los patios de chatarra de las industrias de esos tiempos, miles de quetzales eran arrojados a estos patios de desechos, bajo la apariencia de partes y piezas desgastadas u obsoletas, las que cumplieron su función industrial reposando largos años en bodegas como repuestos que nunca fueron utilizados.

La optimización del empleo de los recursos no renovables constituye la base en la cual se ha cimentado la tecnología del mantenimiento preventivo por soldadura, conocida también como tecnología de conservación.

El presente trabajo de graduación, presenta el procedimiento de termorociado en frío el cual se puede colocar entre uno de los muchos

procedimientos de soldadura para poder dar un tratamiento de recuperación de piezas, las cuales se consideraban no reutilizables u obsoletas así como los diferentes procedimiento y técnicas de termorociado, además de la relación de costos para poder facilitar la decisión que se presenta muy a menudo en la vida del ingeniero encargado de mantenimiento, recuperar o reemplazar.

1. TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA DE MANTENIMIENTO

La optimización del empleo de los recursos no renovables constituye uno de los principios básicos, en las cuales, se ha cimentado la tecnología del mantenimiento preventivo por soldadura, conocida también como tecnología de conservación.

A objeto de poder comprender en su totalidad el significado y campo de acción de la soldadura de mantenimiento, y más aún, sus diferencias respecto a la tecnología de la soldadura de fabricación, se consideran los siguientes temas.

1.1 Soldadura de producción

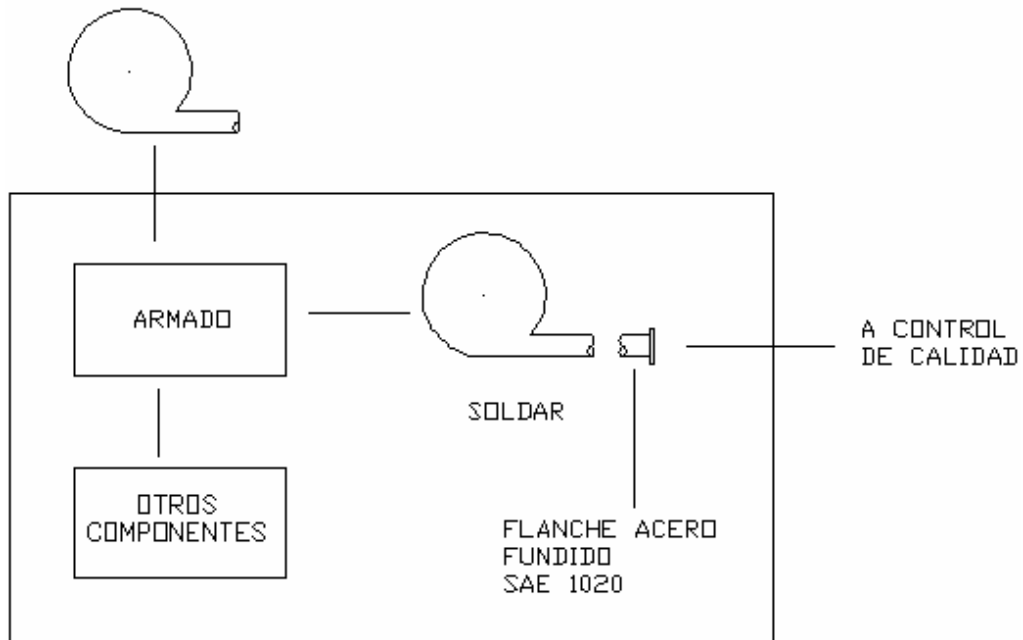
La soldadura de producción abarca el campo de la fabricación.

El diseño de un producto implica definir completamente las características del mismo en cuanto a forma, material y ejecución. En otras palabras, todos los parámetros antes mencionados son conocidos al iniciarse el proceso de soldadura.

Lo anterior se ilustra mejor con un ejemplo:

La industria X fabrica bombas centrífugas. Un modelo de sus bombas deber de llevar un anillo de acero fundido a la salida de la carcaza, la cual es de hierro fundido.

Figura 1. **Diagrama del proceso de soldadura de producción**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 12.**

Tanto el anillo de acero fundido, fabricado en la misma industria, como la carcasa tienen especificaciones concretas y de todos conocidas.

En el proceso de soldadura, el soldador conoce ambos metales y sus características, y además el ingeniero de diseño ha especificado también el electrodo a usar en dicha unión.

El soldador, por lo tanto, procede a efectuar el trabajo de soldadura conociendo absolutamente todas las variables que inciden en el proceso (metales bases, procedimiento, aportes, etc.). Su mayor preocupación y atención la pondrá en efectuar un depósito sano, es decir, se esmerará en sus habilidades manuales.

1.2 Soldadura de mantenimiento

A modo de relacionarlo con el tema anterior se presenta el siguiente caso:

El ingenio azucarero Y. En dicho ingenio un supervisor de la planta, envía una orden de trabajo al departamento de mantenimiento del ingenio.

1. Carcaza bomba *Haskins*. Reparar fisura. Clasificación Urgente.

Se recibe el trabajo en el departamento de mantenimiento.

Información disponible:

- Metal base: hierro fundido (no se conoce composición).
- Las bombas *Haskins* son antiguas, no se dispone de catálogos.
- El hierro fundido se encuentra altamente contaminado.

El trabajo se asigna al soldador J quien para poder ejecutar el trabajo adecuadamente requiere:

- a.- Conocer composición química metal base
- b.- Procedimiento de aplicación

Dentro de los hierros fundidos existe una enormidad de tipos y la soldabilidad de cada tipo varía en cuanto a procedimientos, por lo que el soldador inicia su trabajo a ojos vendados.

Se dirige a bodega y solicita electrodos para hierro fundido. Se le entregan cinco libras y procede a efectuar el trabajo.

Inmediatamente después de depositar el segundo cordón, la fisura se rasga aún más, tornando en impracticable la operación de sellado y se estima que la carcaza debe botarse.

Analizando lo ocurrido:

- a) El electrodo de aporte, normalizado, requirió gran amperaje, lo cual implicó una desmesurada transferencia de calor del electrodo a la carcaza, tornando aún más crítico el sellado de la fisura.

Además, efectuado un análisis químico de la pieza, resulto que ésta tenía un contenido de carbono de 3.60% y Cr de un 15.8%, ante lo cual la elección del aporte a usar es básica para tener éxito en la reparación.

Por lo tanto, factor 1: aleación adecuada.

- b) El soldador procedió a efectuar la reparación con sus mejores habilidades. Lamentablemente, esto no es suficiente. El soldador de mantenimiento requiere un profundo conocimiento teórico-práctico de la soldabilidad de metales y en especial en lo concerniente a los procedimientos para soldar hierro fundido.

Por lo tanto, factor 2: capacitación.

Tanto la correcta aleación como la capacitación del personal de mantenimiento son claves a la hora de realizar la reparación, lo que nos deja el concepto que la soldadura de mantenimiento es más delicada ya que tenemos materiales que son extraños o que no conocemos sus características mecánicas y químicas, por lo que este tipo de soldadura requiere de un especial cuidado por parte de las personas que la realizan.

1.3 Desarrollo de las aleaciones para mantenimiento

Dada la escasez de información disponible en trabajos de mantenimiento, la tecnología de la soldadura aplicada en reparación, derivó al campo de las aleaciones especiales, desarrollándose aleaciones y procesos de superiores cualidades.

La filosofía presente detrás de este enfoque es sumamente lógica. La única manera de suplir las adversas condiciones en las que se desenvuelve la soldadura de mantenimiento es proveer aleaciones de elevada calidad que permitan aumentar la confiabilidad de las reparaciones efectuadas.

Además, los estudios efectuados comprobaron que el costo del riesgo inherente al empleo de soldadura corriente en trabajos de mantenimiento, es infinitamente superior al costo de utilizar aleaciones más adecuadas para este rubro, especialmente diseñadas para trabajar sobre superficies contaminadas, metales disímiles, etc.

Junto con este desarrollo, surgieron nuevas aleaciones antidesgaste cuyas características son proveer composiciones químicas y propiedades mecánicas diseñadas en función al desgaste a combatir (abrasión, calor, impacto, fricción, corrosión, erosión y cavitación).

Es así como se dispone hoy en día de aleaciones y procesos que permiten aumentar significativamente la vida útil de partes y piezas.

1.4 Análisis de inventarios

Hoy en día, dado el costo del dinero y la presión consiguiente por reducir costos, el manejo racional de inventarios es básico en toda empresa.

Este concepto adquiere cada vez mayor importancia y la tendencia es minimizar la incidencia del mantenimiento de inventarios en las finanzas de la empresa, reduciendo el número de piezas y equipos que se mantienen en la bodega.

En porcentajes conservadores, el costo de un inventario se puede descomponer en:

- Interés de capital 12%
- Obsolescencia y depreciación 8%
- Administración del inventario 5%
- Seguro 1%

Para un total de 26%, en moneda real, debe sumarse además la inflación.

En otras palabras, si se mantiene una pieza en inventario durante cuatro años, el costo de mantenimiento de la pieza, durante dicho período, equivaldrá al costo de la pieza nueva. No es difícil encontrar esta situación en el campo industrial.

¿Qué empresa puede hoy darse el lujo de guardar capital en forma de inventario sobredimensionado? ¿Cuál es el costo de oportunidad que ello implica, considerando que dichos recursos pueden emplearse en forma productiva? (Generación de más capital con el sólo hecho de depositar dicho dinero en la institución financiera más cercana).

Si se buscan casos como este dentro de la industria de hoy en día se encontrarán casos presentes (ejes de bombas, molinos, cuchillas, etc.), se llega a cifras bastante impresionantes, pero desgraciadamente reales, del costo que significa desechar piezas prematuramente y mantener inventarios

sobredimensionados que mediante procesos de mantenimiento tecnificados, pueden ser drásticamente reducidos.

2. MECANISMOS DE DESGASTE

El desprendimiento de metal originado por el desgaste de una pieza mecánica puede variar notablemente, de muy intenso a insignificante. En cualquier caso, resulta de ello una pérdida de eficacia o un deterioro de la pieza.

El problema de desgaste se presenta en todo tipo de sistemas industriales. Los casos más graves se presentan en determinadas industrias: minas, ingenios azucareros, siderurgia, petróleo, química y centrales eléctricas, por no mencionar más que algunas. Por ejemplo, en un estudio realizado en la Universidad de *Michigan*, Estados Unidos de América, afirma que un camión de cinco toneladas, completamente desgastado, pesa sólo 2.3 kilogramos (5.06 libras), menos que cuando estaba nuevo. Lo que da una referencia que un desgaste que pareciera insignificante puede dañar completamente un sistema mecánico, como lo es en este caso el vehículo de carga.

La tecnología de los recubrimientos protectores puede contribuir a la solución de numerosos problemas de desgaste mediante la aplicación de aleaciones diseñadas específicamente para combatir cada uno de los mecanismos de deterioro superficial como la abrasión, corrosión, calor, etc. A objeto de poder seleccionar un sistema de aleación apropiado para cada caso, es de primordial importancia poder determinar con el mayor grado de aproximación posible, el tipo de desgaste al cual se le atribuye el fenómeno de deterioro superficial. De lo anterior se desprende la necesidad de conocer y entender los principales mecanismos de desgaste con los cuales se enfrenta la industria en su operación. Tanto los ingenieros responsables del mantenimiento, como de la administración de planta deben tomar

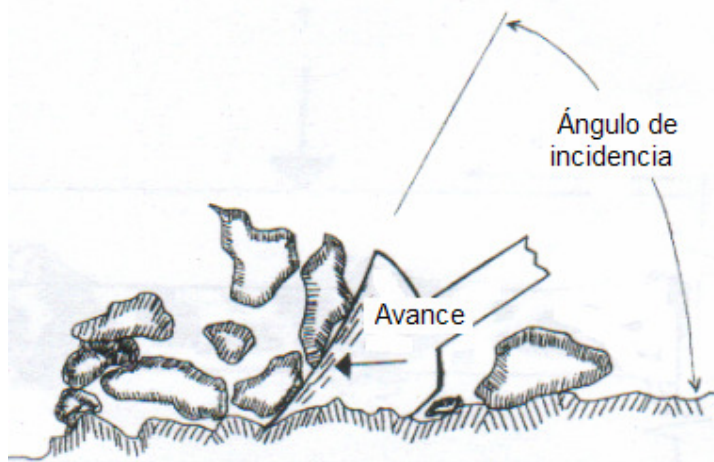
conciencia del alto costo que significa la pérdida de material en sus sistemas mecánicos y estar al tanto de los beneficios que brinda la tecnología de recubrimientos protectores.

2.1. Abrasión

El término abrasión se emplea para describir las varias formas de desgaste superficial causado por el movimiento relativo de partículas duras o abrasivas sobre dicha superficie.

El grado de abrasión depende de la naturaleza de las partículas abrasivas, su morfología, tamaño y dureza, además del grado de humedad de la superficie. Otros factores determinantes incluyen la presión ejercida por la partícula sobre la superficie, la concentración de partículas abrasivas, el ángulo de incidencia de éstas sobre la superficie y la velocidad relativa partículas-superficie.

Figura 2. **Ángulo de incidencia de partículas abrasivas**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 19.**

2.1.1 Abrasión pura o de bajo esfuerzo

Partículas deslizándose libremente sobre la superficie a un ángulo de incidencia pequeño. Un ejemplo característico de abrasión pura es el transporte de partículas finas (arenas o cemento) mediante un tornillo sinfín. En este caso las partículas no se rompen con la carga.

Figura 3. **Transporte de arena por medio de fajas de hule**



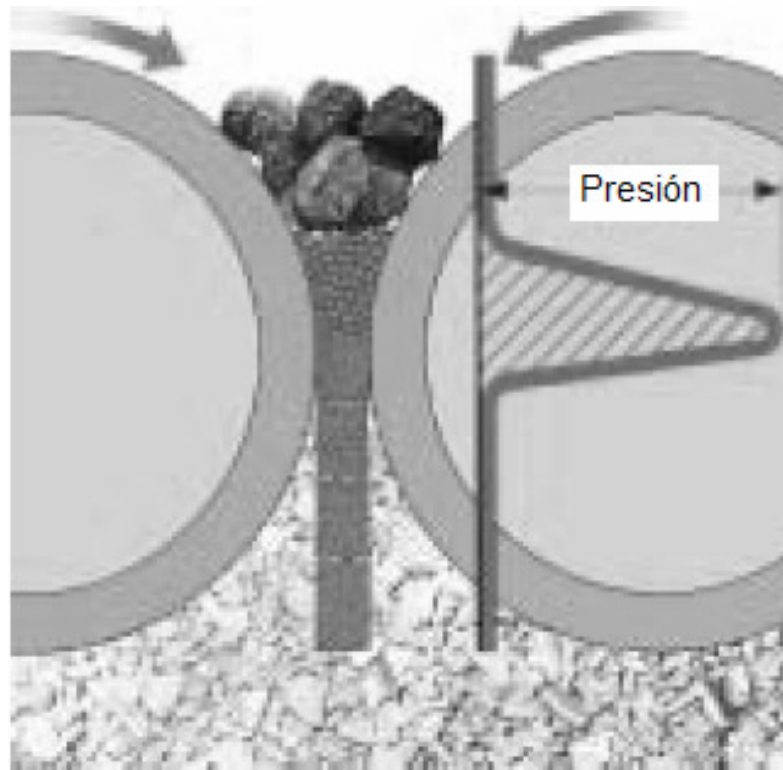
Fuente: **Fotografía tomada en planta productora de cemento**

2.1.2 Abrasión de alto esfuerzo

Fenómeno de esmerilado producto del contacto de altas presiones del abrasivo sobre la superficie.

Es frecuente encontrar este tipo de abrasión presente en superficies que se deslizan entre sí en medio de partículas que ejercen elevadísimas presiones sobre dichas superficies. Un caso común de abrasión de alto esfuerzo queda ejemplificado en el desgaste de masas de los rodillos trituradores, en donde partículas de arena, caña de azúcar, etc. Son desplazados bajo altas presiones. El deterioro ocurre por flujo plástico local y agrietamiento microscópico de la superficie de la masa, acompañado por fenómenos corrosivos.

Figura 4. **Descripción de mecanismo de desgaste de abrasión de alto esfuerzo**

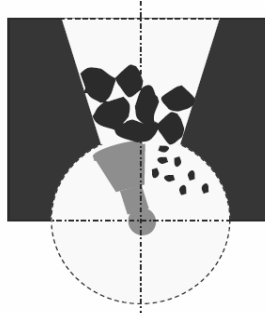


Fuente: **Castolin Eutectic. Manual de desgaste, Pág. 2.**

2.1.3 Abrasión por desgarramiento

Este tipo de abrasión se caracteriza por la presencia de abrasivos de mayor tamaño, los que someten a la superficie a un grado de impacto y a altos esfuerzos de compresión. El ángulo de incidencia es generalmente mayor que en el caso del mecanismo de abrasión de bajo esfuerzo. La remoción del material en abrasión por desgarramiento se debe a la deformación plástica, subsiguiente endurecimiento y desgarre de las partículas metálicas.

Figura 5. **Descripción del mecanismo de desgaste de abrasión por desgarramiento**

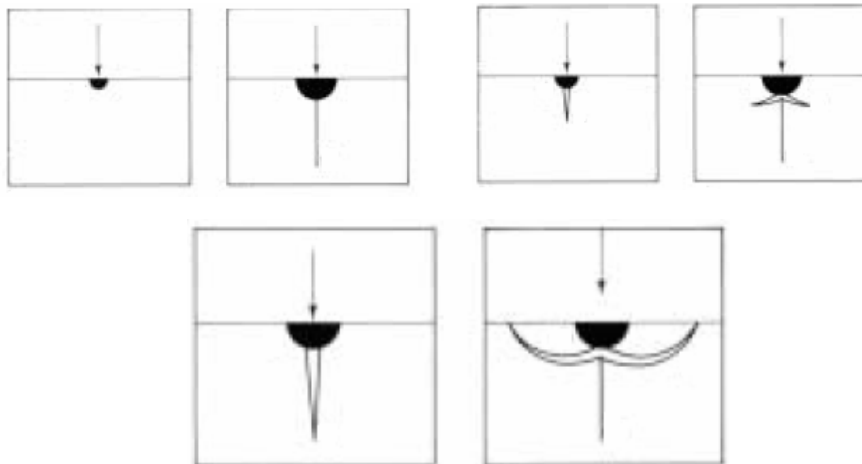


Fuente: *Castolin Eutectic. Manual de desgaste, Pág. 2.*

2.2 Impacto

El desgaste por impacto, aún cuando no requiera mayor definición, es conveniente analizarlo desde un enfoque de transferencia de energía.

Figura 6. **Descripción del mecanismo de desgaste de impacto**



Fuente: *Castolin Eutectic. Manual de desgaste, Pág. 3.*

Considerando la figura anterior. En ella, una partícula (metálica o no metálica) choca contra una superficie. Dicha partícula posee un cierto grado de energía debido a la velocidad que lleva y a su masa. Esta energía cinética viene expresada por:

$$E = (mv^2) / 2$$

Como se sabe, por la ley de conservación, la energía no se pierde, sólo se transforma. Para este caso, la energía acumulada se convierte, al impacto, en trabajo de deformación plástica o elástica, dependiendo de la característica de la superficie, y su habilidad de poder absorber dicha energía.

La habilidad de poder absorber la energía del impacto en un metal, viene en gran parte determinada por las características de tenacidad del mismo. La propiedad de tenacidad se puede definir como la capacidad de un metal de admitir el impacto de una carga aplicada rápidamente y depende de los valores de elongación, tensión de ruptura y ductilidad del material.

Los aceros al manganeso austeníticos o *hadfield* constituyen un ejemplo típico de aleación con buenas características de resistencia al impacto.

Si la superficie es frágil por el impacto puede fracturarse fácilmente, pero si es tenaz cederá por deformación elástica o plástica de forma que se evitará la fractura o al menos se retrasará. El material de impacto puede ser metálico o no metálico, por ejemplo las contra superficies de una matriz en una prensa, o los dientes de una pala excavadora al golpear la roca.

Algunos de los efectos del impacto son los siguientes: agrietamiento por fatiga, desconche, compresión y deformación. Prácticamente todos los

casos de impacto producen una combinación de estos efectos y provocan un debilitamiento de la micro estructura de la pieza de forma que otros mecanismos de desgaste pueden desarrollarse fácilmente.

Numerosas aleaciones metálicas se endurecen mecánicamente cuando se someten repetidamente al impacto. El impacto genera fallos en la micro estructura metálica (dislocaciones) como nudos, que se hacen mayores en número y se enredan con la repetición de los impactos. Estos nudos no dejan que el metal se deforme elástica o plásticamente como sucedería normalmente y por el contrario, confieren al metal un comportamiento más frágil. Los materiales típicos que se emplean en esta situación son aceros hadfield endurecidos mecánicamente con un 13% de manganeso. Es importante disponer de una matriz tenaz y una fina micro estructura, de forma que las grietas no se propaguen a través del material y provoquen el desconche de grandes fragmentos. El material de protección tiende a ser grueso y debe unirse metalúrgicamente al substrato (no proyectarse térmicamente) para permitir grandes deformaciones elásticas y plásticas con el impacto.

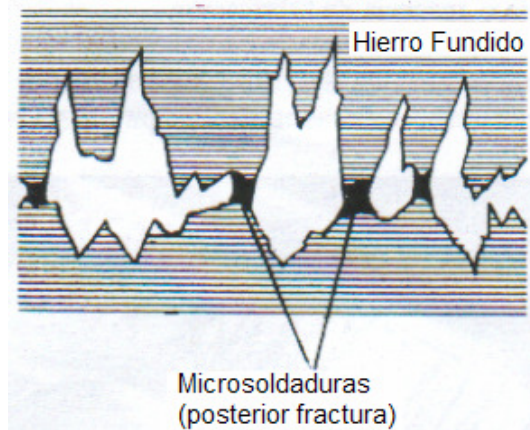
2.3 Fricción

El mecanismo friccional que genera pérdida de material por rozamiento de una superficie metálica contra otra, está presente en forma amplia en toda planta industrial y constituye uno de los más activos agentes del desgaste de partes y piezas.

El examen microscópico de las superficies permite visualizar la micro rugosidad real, que existe en piezas que en un examen macroscópico se ven pulidas. En efecto, las mismas son una sucesión de montes y valles de topografía aguda. El desplazamiento relativo de una superficie contra la otra produce el choque de aristas encontradas y se genera una deformación localizada, aumento de temperatura y ruptura de dichas aristas.

Se ha constatado además, el efecto de soldeo debido a elevadas temperaturas puntuales que se generan, entre las aristas de contacto. Dichas aristas, micro soldadas, dan lugar a remoción de metal en aquel que tenga menos dureza. Incluso, algunas de estas partículas desprendidas se ligan al metal mas duro, dando lugar a la formación de una película fuertemente adherida. Por otro lado, se produce un efecto de abrasión de bajo y alto esfuerzo al existir partículas libres en el sistema, que tenderán a penetrar y/o rayar generalmente la superficie más blanda.

Figura 7. **Mecanismo de desgaste de fricción**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 23.**

Aún cuando no existe una teoría general que explique el mecanismo de desgaste por fricción, se definirá una serie de variables que inciden en dicho fenómeno:

- Variables metalúrgicas:
 - Materiales en consideración.
 - Estructura de esos materiales y como se ven afectados por la temperatura.
 - El efecto de uno de los materiales difundiéndose en el otro.
- Variables físicas:
 - Temperaturas de fusión de los metales.

- Dureza de los metales.
- Conductividad térmica.
- Capacidad calorífica.
- Densidad.
- Variables mecánicas:
 - Modulo de elasticidad de cada uno de los metales.
 - El coeficiente de *Poisson*.
 - Presión de trabajo.
- Otras variables:
 - La rugosidad de las superficies.
 - Tratamiento superficial.
 - Velocidad relativa de las superficies en contacto.
 - La presencia o ausencia de lubricación.

2.4 Corrosión

La corrosión es uno de los fenómenos más importantes y destructivos dentro de la gama de desgaste anteriormente definida, debido a la variedad de formas, en las cuales se manifiesta. Es frecuente encontrar desgaste corrosivo en casi todos los sectores de la industria, particularmente donde las piezas están en contacto con agua fresca o salada, en ambientes básicos o ácidos, o cuando las mismas están expuestas a gases a temperaturas normales o elevadas (motores de combustión interna por ejemplo). En una forma u otra, la corrosión está presente en virtualmente todos los procesos industriales.

Se puede definir la corrosión, como un ataque químico sobre un material, debido al ambiente que lo rodea. Esta reacción química puede ser iniciada por varios fenómenos.

El desgaste por corrosión puede ser evidente sobre toda la superficie de un metal, pero presenta riesgos igualmente serios cuando se exhibe como marcas localizadas que son observables con cierta dificultad.

Dos tipos básicos de corrosión pueden ser definidos.

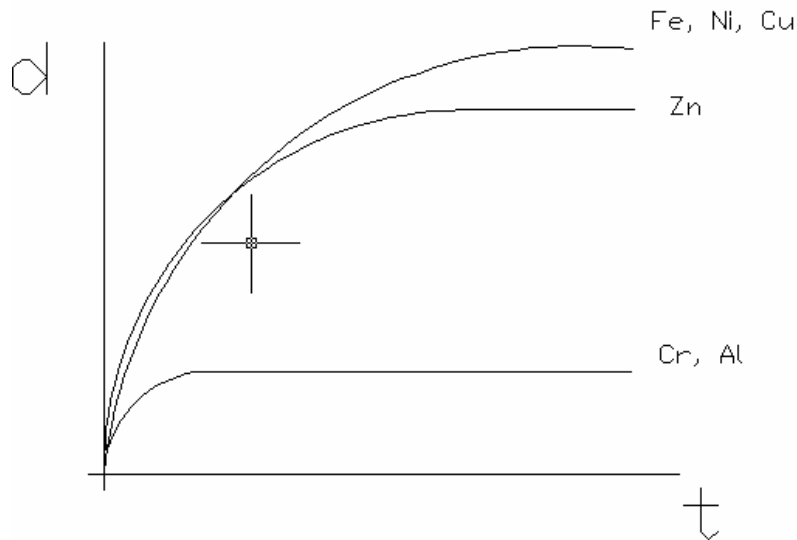
2.4.1 Corrosión por oxidación

Se define como una reacción química que ocurre entre el metal y el ambiente que lo rodea, sin iniciar una corriente eléctrica. Los metales tienen distinta afinidad por el oxígeno y se combinan con él para formar óxidos metálicos. La difusión o extensión de la oxidación hacia el interior del metal depende de las características de la capa oxidada.

Si la capa es químicamente estable e impermeable, se convierte en una capa protectora y la oxidación no continúa. El metal mismo puede considerarse como pasivo. Por otro lado, si la capa es permeable y poco estable, la oxidación se extenderá al interior del metal. La velocidad de oxidación depende de las propiedades del metal y, lo más importante, la temperatura.

En la grafica siguiente se puede observar la relación entre la profundidad de oxidación d y la temperatura t , para varios metales, los cuales pueden ser resistentes a la oxidación a bajas temperaturas, pero pueden fallar rápidamente a altas temperaturas. Si la resistencia a la oxidación se mantiene a elevadas temperaturas, en el rango de los 800 grados centígrados, se dice que el material es refractario.

Figura 8. **Relación entre profundidad d de oxidación y la temperatura t para varias composiciones químicas de metales**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 25.**

La abrasión o la erosión puede acelerar el deterioro por corrosión, al destruir continuamente el óxido estable y protector formado por la reacción de oxidación en algunos metales.

Es el caso de los óxidos de cromo y aluminio, por ejemplo, proveen una película protectora contra subsecuentes ataques corrosivos y en los cuales se observa una profundidad de oxidación bastante menor, aún a altas temperaturas.

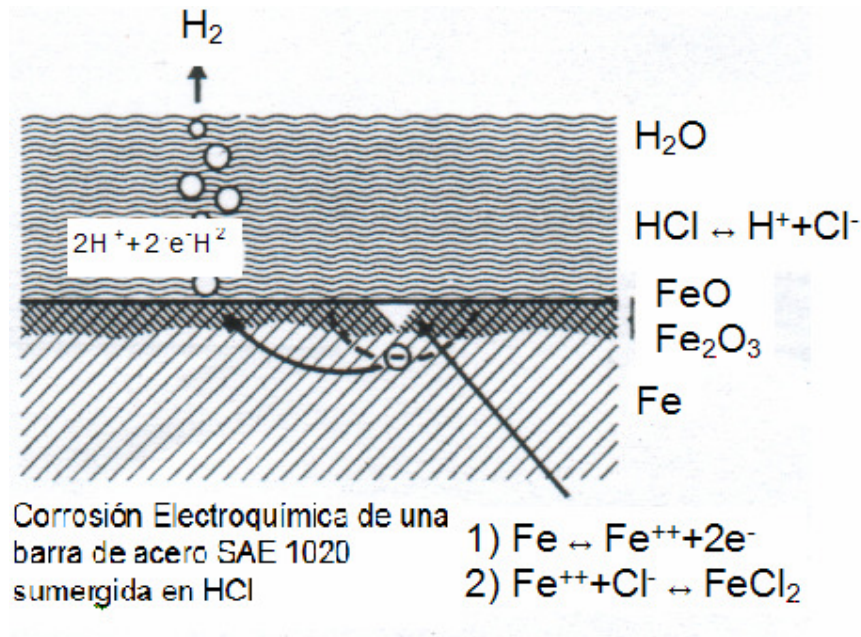
2.4.2 Corrosión electroquímica

La corrosión en estado seco es generalizada por naturaleza, es fácilmente observable y su tasa de progresión es conocida debido a la variación del peso de la pieza.

Por otro lado, existen fenómenos corrosivos más serios, que se encuentran más localizados, de naturaleza electroquímica y difíciles de detectar. El término electro químico implica una reacción química y un flujo inducido de corriente eléctrica en el sistema. Un requisito para que se produzcan dichos mecanismos es la existencia de un conductor en estado líquido comúnmente llamado electrolito.

Este fenómeno se desarrolla cuando existe inestabilidad química causada por uno o varios factores, a saber, la concentración de oxígeno disuelto del electrolito, contacto de metales disímiles o poco uniformidad de la capa de oxidación.

Figura 9. Descripción de la corrosión electroquímica



Fuente: **John D. Streeter**. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 25.

La figura anterior esquematiza la acción corrosiva que se produce en una barra de acero de bajo carbono, sumergida en una solución de ácido clorhídrico. Siendo ácida, la solución es conductora. Contiene iones de H^+ y Cl^- producto de la disociación del ácido HCl.

La barra de acero está cubierta por una capa compactada de óxido. Debido a las irregularidades de la capa oxidada, o donde la misma se ha quebrado, hay lugares en donde el metal está en contacto directo con el electrolito. Como el hierro tiene una gran afinidad por iones de cloro (Cl^-), se asocian para formar cloruro de hierro ($FeCl_2$) y se produce un sobrante de electrones (cargas negativas) los cuales son atraídos a áreas de carga positiva, generándose una corriente eléctrica. Los electrones se asocian con los iones de hidrógeno (H^+) para formar H_2 , el cual aparece en la superficie como burbujas.

El proceso de desgaste es por ende, una reacción química entre el metal y su ambiente, que produce una corriente eléctrica en el metal y una segunda reacción química sobre la superficie del mismo. Más corrosión se produce si el derivado de $FeCl_2$ se disuelve en el líquido, dejando al Fe expuesto al electrolito. El ciclo es continuo y conlleva el deterioro y perforación de la barra de acero.

La corrosión galvánica constituye un buen ejemplo: el desequilibrio es causado por contacto entre dos metales disimilares inmersos en un medio conductor.

La afinidad química de cada metal por el electrolito es distinta. El metal con la mayor afinidad por el electrolito se corroe mientras que el otro favorece la producción de hidrógeno en su superficie. El mejor ejemplo de lo anterior lo proveen las embarcaciones, que tienen distintos metales para el casco, hélice y otros bajo el agua. Para evitar el ataque galvánico, placas pequeñas de metales cuya afinidad por iones de cloro en agua de mar es

mayor que la de los otros metales que se desea proteger, se sueldan al casco. Dado que son placas de sacrificio (generalmente zinc o aluminio) estas se reponen permanentemente.

Se observa que la corrosión es un fenómeno complejo. Por ejemplo, el cambio en la concentración de un medio agresivo puede alterar el comportamiento de un metal.

Un componente químico, puede ser soluble cuando la concentración del medio está al 10% y provocar por tanto corrosión. Puede tornarse insoluble cuando la concentración excede el 50%, proveyendo un óxido protector. Ello explica porque un ácido altamente corrosivo como el ácido sulfúrico, puede producir más daño diluido que cuando se encuentra en una solución altamente concentrado, como es el caso de concentraciones del 15% y 80% respectivamente sobre una placa de acero inoxidable del tipo 304.

Los principales factores que influyen directamente la corrosión son varios:

- Medio corrosivo:
 - Concentración.
 - Impurezas.
 - Contenido de oxígeno.
 - pH.
 - Temperatura.
 - Velocidad de flujo y presión.
 - Partículas en suspensión.

- Tipo de metal:
 - Composición.
 - Proceso de manufactura.

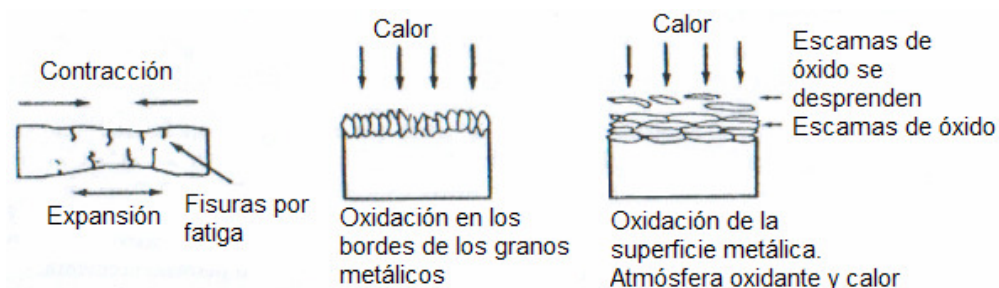
- Impurezas.
- Tratamiento térmico.

2.5 Calor

Las condiciones de operación bajo altas temperaturas es otro factor que contribuye al desgaste de partes y piezas metálicas. Existe una gran variedad de procesos que involucran elevado calor como son la fundición, forja en caliente, refinación y muchos procesos químicos.

En general, cuando los metales operan bajo condiciones constantes de alta temperatura, el desgaste es básicamente de naturaleza química. La alta temperatura actúa como un catalizador para una gran variedad de mecanismos de oxidación. A medida que se eleva la temperatura, la reacción química con el oxígeno aumenta. Se produce también efectos deteriorantes del metal cuando éste se encuentra sometido a una amplia variación de temperatura en períodos de tiempo cortos. Esto causa, en adición a los problemas del calor, una situación donde el cambio brusco térmico puede convertirse en el desgaste primario. La expansión y contracción no uniforme de distintas áreas de la pieza puede causar agrietamiento, distorsión, resblandecimiento y muchos efectos más.

Figura 10. **Descripción del mecanismo de desgaste por calor**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 28.**

2.6 Erosión

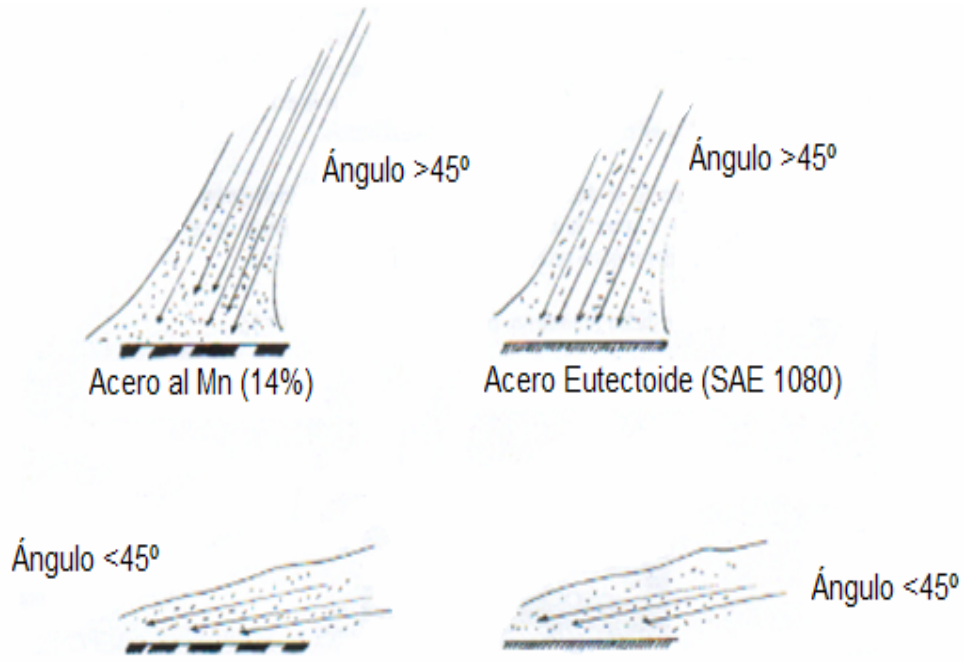
La erosión se diferencia del mecanismo de abrasión, en el hecho de que el abrasivo (arena, partículas de bagazo, etc.), es proyectado en un flujo fluido o gaseoso contra la pieza. La energía cinética de las partículas abrasivas es transferida al componente, lo que da lugar al deterioro superficial.

Una parte de la energía cinética es consumida por la pieza, causando deformación elástica o remanente en función del grado de tenacidad del metal. Otra parte es agotada por la partícula abrasiva misma, ya sea como velocidad de rebote o energía que lleva a la partícula a fracturarse.

El grado de deterioro superficial como hemos mencionado dependerá de la tenacidad y dureza del metal base, dureza, granulometría y morfología del abrasivo, además del ángulo de incidencia del haz erosivo respecto a la superficie.

Dicha variable (ángulo de incidencia) es de extrema importancia cuando se desea seleccionar un recubrimiento protector apropiado, por lo cual se analizará con más detención.

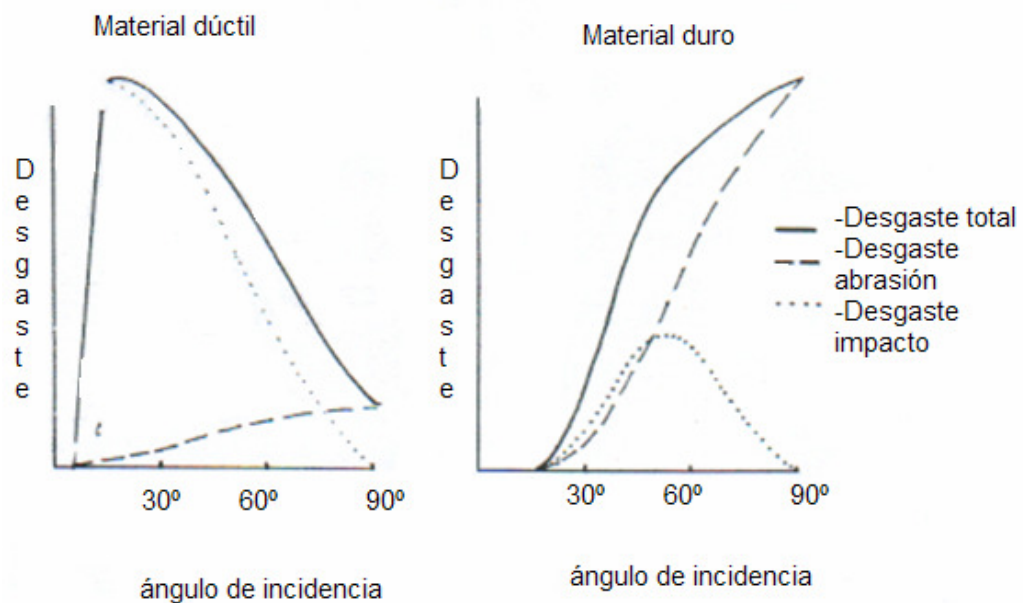
Figura 11. **Ángulos de incidencia de flujos que producen erosión**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 29.**

Se aprecia en la figura anterior un haz erosivo impactando a 45 grados y 15 grados respectivamente sobre una placa de acero al manganeso austenítico y también sobre otra de acero de alto carbono, templado alcanzando una dureza de 55 en la escala *Rockwel C*. Esta prueba realizada como parte de un trabajo de investigación doctoral por *G. L. Sheldon*, arroja interesantes conclusiones respecto a la importancia del ángulo de incidencia, las cuales se pueden resumir en las curvas de desgaste observadas, las cuales se reproducen a continuación:

Figura 12. **Ángulo de incidencia contra desgaste**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 30.**

Para el acero al manganeso austenítico, considerando como una aleación dúctil, se observa que entre los 10 y 40 grados de incidencia, la tasa de desgaste es elevada. Sin embargo para ángulos mayores de 50 grados la misma se reduce notablemente.

La explicación de este fenómeno se basa en que para ángulos pequeños, el abrasivo tiende a rasgar el material, sobrepasando los esfuerzos generados por el límite elástico de este acero, deformando y posteriormente produciendo el desprendimiento. Para ángulos mayores a los 50 grados, el abrasivo, con gran energía cinética en relación a su masa, somete al material a un trabajo de impacto. Como se ha observado anteriormente, un material tenaz y/o dúctil, tiene buenas propiedades de absorción de la energía que transmiten las partículas al impacto.

Por el contrario en un material extra duro, como un acero eutectoide, tratado térmicamente, a ángulos de incidencia grandes, se producirá la

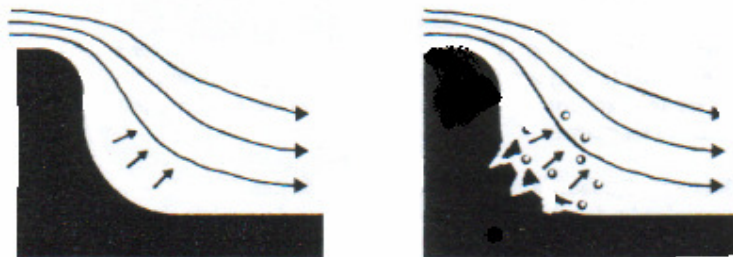
micro fisura del mismo, debido al chorro erosivo, ya que no podrá absorber la energía de las partículas en proyección.

Lo anterior demuestra la necesidad de estudiar con detención los fenómenos de desgaste erosivo, antes de seleccionar un material de recubrimiento.

2.6 Cavitación

La cavitación es la formación de burbujas en un fluido que tiene movimiento relativo a alguna superficie sólida. Cuando la velocidad cambia, el vacío provocado o la fricción del fluido ocasionan conversión de energía en el fluido, de tal manera que la presión estática se reduce a la presión de vapor del líquido, ocasionando ebullición y formación de burbujas de cavitación.

Figura 13. **Mecanismo de desgaste de cavitación**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 31.**

Existen una serie de teorías que intentan describir los fenómenos de deterioro superficial por cavitación. Entre las mismas, la teoría de *Beeching* es la más aceptada. *Beeching* sostuvo que, el deterioro por cavitación es la desintegración mecánica de las capas superficiales bajo altos pulsos de presión localizados y repetidos. Estos pulsos son ocasionados por la

repentina desaparición de las burbujas en contacto con la superficie o cercana a ésta.

Los pulsos de presiones localizados, según describe el investigador *Beeching*, se puede considerar como micro ondas que producen un efecto de impacto concentrado en áreas pequeñas, lo que en el tiempo conduce al fatigamiento del material. Este fenómeno se conoce también como erosión por cavitación.

3. RECUBRIMIENTOS PROTECTORES, SISTEMAS Y PROCESOS PARA SU APLICACIÓN

Los desastrosos y costosos efectos del desgaste pueden ser reducidos considerablemente mediante la aplicación de recubrimientos protectores, los que permiten incluso mejorar las características superficiales originales de la pieza, prolongando la duración en servicio de las mismas.

Más aún, los fabricantes de maquinaria, concientes del potencial que ofrece la aplicación de los recubrimientos protectores y conociendo detalladamente las condiciones de servicio de sus equipos, han comenzado a proteger preventivamente las superficies más críticas de éstos como norma de fabricación.

Las industrias fabricantes de sistemas de bombeo, turbinas terrestres y de aviación, maquinaria papelera e imprenta aplican recubrimientos protectores en sus partes y piezas originales.

Es de fundamental importancia seleccionar el sistema de recubrimiento apropiado en función del mecanismo de desgaste presente. Por ello, la determinación de dicho mecanismo en forma acertada se convierte en la piedra angular del problema.

El diagnóstico acertado implicará la selección de un recubrimiento apropiado. En la práctica, los fenómenos de desgaste rara vez se presentan en su categoría elemental (abrasión, impacto, corrosión, calor, fricción, cavitación y erosión) sino que en general nos encontramos con que un componente está expuesto a una combinación.

El vertiginoso desarrollo que ha experimentado la tecnología de los recubrimientos protectores, permite hoy en día a la industria el poder contar con una amplia gama de aleaciones metálicas, cerámicas, carburos y compuestos metálico orgánico, para poder enfrentar las más severas situaciones de desgaste.

Este amplio abanico de soluciones antidesgaste exhibe a la vez una completa familia de procesos y sistemas para su aplicación. La selección de un determinado proceso o sistema para aplicar un recubrimiento antidesgaste queda determinada por los siguientes factores:

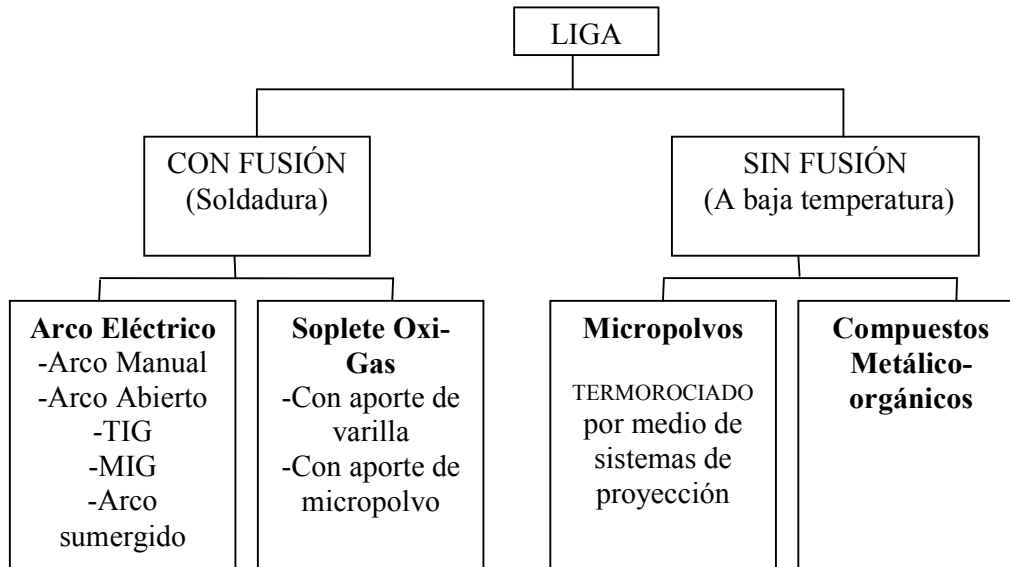
- Mecanismo de desgaste.
- Forma y dimensión del componente.
- Cantidad de aleación a aplicar (libras).
- Requisitos de aplicación y/o dificultades de acceso.
- Necesidades de terminación de la superficie.

A continuación se efectúa una clasificación de los procesos usualmente empleados para aplicar revestimientos protectores, los cuales se han dividido básicamente en procesos de liga metalúrgica por fusión o difusión y en aquellos que se aplican a bajas temperaturas, sin fusión del metal.

3.1 Clasificación de procesos en función del mecanismos de liga con el metal base

La clasificación de los procesos en función del mecanismo de liga con el metal base se puede entender más fácilmente con el siguiente cuadro.

Tabla I. **Mecanismos para aplicar revestimientos protectores**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 97.**

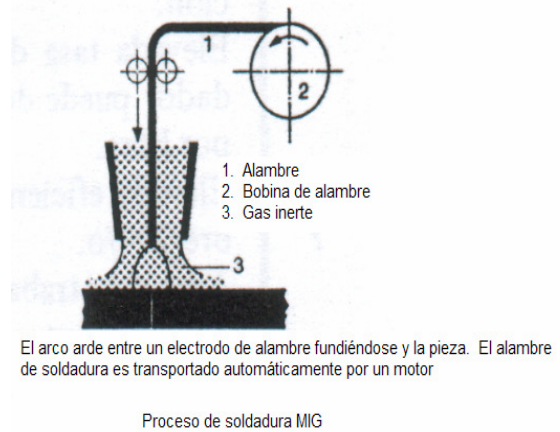
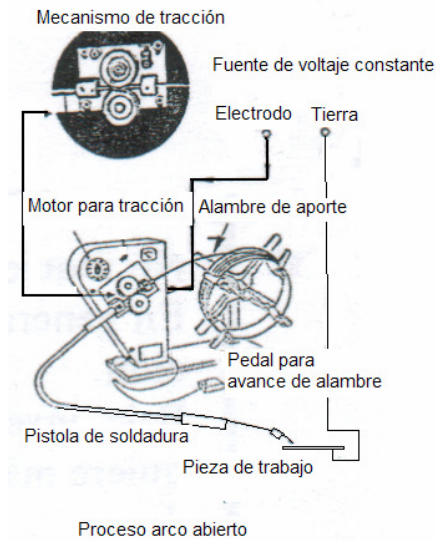
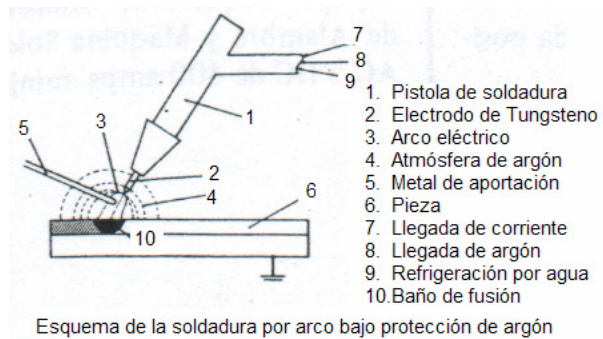
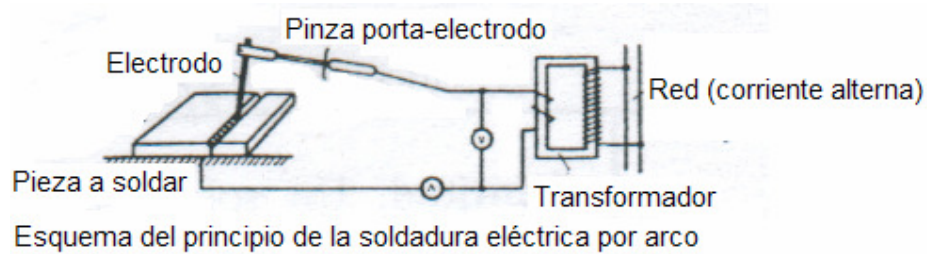
3.2 Descripción de procesos por soldadura con fusión o aleación superficial

3.2.1 Arco eléctrico

En el proceso por arco eléctrico, como su nombre lo indica, se establece un arco entre un cátodo y un ánodo, el cual provee la energía térmica para fundir controladamente el metal base (pieza) y la aleación de aporte, que puede ser una varilla revestida (electrodo), desnuda con protección gaseosa (caso TIG) o alambre continuo que viene en rollos, ya sea con fundente interno (caso de arco abierto) o solamente alambre desnudo (caso MIG o MAG y arco sumergido).

Las figuras a continuación describen esquemáticamente cada uno de los procesos de arco eléctrico mencionados.

Figura 14. **Procesos de arco eléctrico**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 98**

El proceso de arco sumergido se asemeja al proceso de arco abierto en cuanto a que el aporte viene en rollo. La diferencia estriba en que el fundente requerido se adiciona externamente sobre la zona a soldar, cubriendo el arco eléctrico formado entre el alambre y la pieza, de ahí el nombre de sumergido.

Tabla II. **Ventajas y desventajas en la utilización de los diversos sistemas de arco eléctrico**

PROCESOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS Y/O REQUISITOS
Arco Manual	<ul style="list-style-type: none"> -No requiere gas externo -En general aplicable en toda posición -Baja inversión inicial: sólo se requiere máquina soldadora apropiada 	<ul style="list-style-type: none"> -Lentitud. Un soldador promedio deposita aproximadamente 1.0 kg. (2.2 lb.) por hora laboral -Baja eficiencia de depósito: 60%
Arco Abierto	<ul style="list-style-type: none"> -No requiere gas externo -En general aplicable en toda posición -Elevada tasa de depósito: un soldador promedio puede aplicar arriba de los 6 kg. (13.2 lb) por hora laboral -Elevada eficiencia de depósito: 90% -Apto para trabajos a la intemperie -Favorece automatización de recubrimientos 	<ul style="list-style-type: none"> Equipo requerido: alimentador de alambre y máquina de soldar AC o DC de 400 amperios como mínimo

Continúa

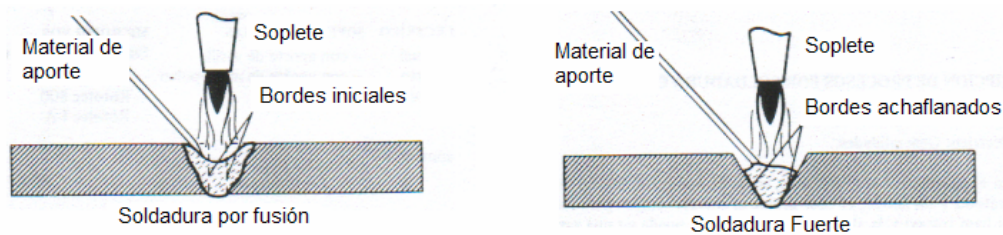
<p>Proceso TIG</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo aporte de calor -Especialmente indicado para uniones delgadas de aceros inoxidables y aplicaciones que requieren gran control de depósito -En general aplicable en toda posición -Depósitos exentos de escoria 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere gas protector argón o helio -Se debe de trabajar en áreas protegidas del viento
<p>Proceso MIG / MAG</p>	<ul style="list-style-type: none"> -En general aplicable en toda posición -Elevada tasa de depósito -Elevada eficiencia de depósito: 90% -Favorece la automatización del recubrimiento -Depósitos exentos de escoria -Sistema portátil 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere gas protector argón o dióxido de carbono -Se debe trabajar en zonas protegidas del viento -Equipo requerido: máquina soldadora y alimentador de alambre
<p>Arco Sumergido</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Elevada tasa de depósito -Elevada eficiencia del depósito -Favorece la automatización del recubrimiento -Depósitos exentos de escoria 	<ul style="list-style-type: none"> -Instalación fija de taller -Para trabajar solamente en posición plana -Requiere fuente de poder, cabezal alimentador de alambre y fundente

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 99.**

3.2.2 Por Fusión oxigas

Como su nombre lo indica, empleando una llama oxigas como fuente de energía se dispone de la suficiente cantidad de calor como para fundir sobre el metal base el material de aporte. La unión metalúrgica entre el recubrimiento y la pieza se produce por difusión molecular, de acuerdo al principio de aleación superficial descubierto por *J. P. Wasserman*, metalurgista suizo hacia el año 1905 o por fusión localizada del metal base y del aporte (soldadura oxigas por fusión) requiriendo este último un mayor aporte de calor para producir la unión.

Figura 15. **Soldadura por fusión oxigas**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 101.**

En ambos casos, el soplete oxigas está conectado a cilindros de oxígeno y gas combustible, como el acetileno (el más empleado por su alta temperatura de combustión), propano, etc., y el aporte se adiciona en forma de varilla revestida o desnuda, caso este último en el cual se debe recurrir a un fundente externo que se aplicará sobre la zona a soldar, a objeto de proveer las características de limpieza y desoxidación requeridas.

El proceso oxigas con aporte de varilla se emplea en uniones de chapas y perfiles delgados de acero, cañerías, en contactores de motores eléctricos, etc. Es ideal para la reparación de ciertas fundiciones de hierro, como puede ser los múltiples de escape y en asientos de válvulas en culatas

de motores. Mediante el proceso oxigas con aporte de varilla, es posible efectuar reconstrucciones de dientes de engranes, así como reparaciones en las mallas de cobre de los filtros tipo prensa.

Es posible también emplear una fuente de energía oxigas para depositar recubrimientos protectores micropulverizados, lo que se conoce como termorociado. En dicho sistema un soplete de diseño especial contiene en un receptáculo la aleación aporte, que se encuentra en estado de micropolvo, lo que se conoce como termorociado en caliente o por fusión. Los gases empleados son oxígeno y acetileno. El oxígeno se emplea también para producir la aspiración del polvo transportado hacia el área a recubrir.

La eficiencia del depósito es elevada y la uniformidad del recubrimiento es tal que en muchas ocasiones no se requiere un acabado posterior.

A continuación se establece una relación de aleaciones micropulverizadas y sus aplicaciones características para estos sistemas.

Tabla III. Composición nominal de la aleación, dureza, aplicaciones y características

COMPOSICIÓN NOMINAL DE LA ALEACIÓN	DUREZA BHN	APLICACIONES CARACTERÍSTICAS
C-Cr-B-Si-Ni-Fe	600	Reconstrucción de levas, cuchillas, válvulas de escape, matrices
Ni-Cr-Fe + carburos de tungsteno	610	Cadenas de transportador, cuchillas, barrenadoras, gusanos de arrastre

Continúa

Ni-B-Si-Fe	370	Reconstrucción de dientes de engranes, chaveteros, rodillos alimentadores
Ni-B-Si + carburos de tungsteno	700	Aspas de ventilador, cuchillas, cadenas
Ni-Fe-Si-B	180	Múltiples de escape, monobloques, engranes, poleas

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 103.**

3.2.3 Proceso para la aplicación de recubrimientos sin fusión del metal base (proceso de termorociado en frío)

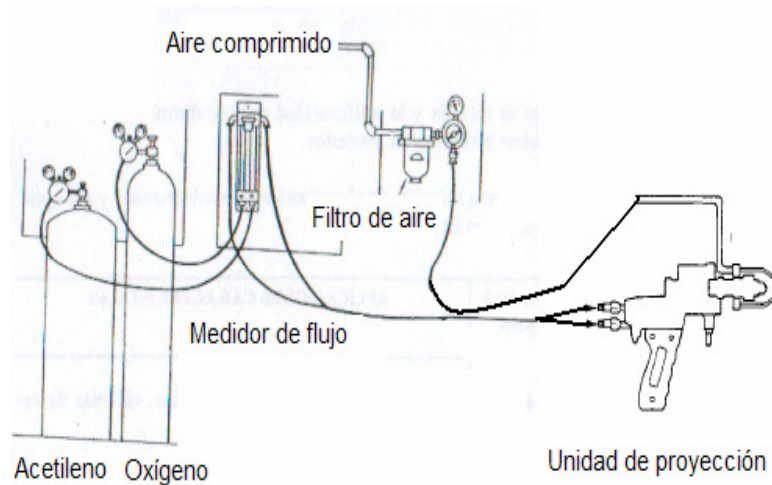
De acuerdo a la clasificación establecida, en esta categoría se encuentran los procesos de micropolvos y los recubrimientos metálico orgánicos.

El proceso de aplicación de micropolvos a baja temperatura se conoce también por las designaciones de rociado térmico, metalización, plasma *spray*, etc. Independientemente del sistema de proyección empleado, se puede definir este proceso como: la proyección de partículas metálicas o no metálicas, plastificadas o fundidas, sobre una superficie limpia y micro rugosa.

Al impactar sobre la superficie previamente preparada, el depósito se adhiere y consolida formando una liga mecánica y metalúrgica con el metal base.

La característica más relevante del proceso de termorociado en frío radica en que el metal de base se mantiene por debajo de 250 grados centígrados, minimizando cualquier posibilidad de deformación o alteración metalúrgica del componente.

Figura 16. **Sistema de operación de un equipo de termorociado en frío**



Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 104.**

La fuente de energía está constituida por gases oxígeno y acetileno (se emplea hidrógeno con algunos micropolvos).

La llama oxiacetilénica producto de la combustión transfiere calor al haz de micro polvos plastificandose en el trayecto de esta unión al metal base. Además las partículas incrementan su energía cinética al ser fuertemente aceleradas contra la superficie a impactar para lo cual se emplean en algunos casos boquillas especiales de aire comprimido.

Las características mecánicas de la mayoría de los depósitos de micro polvos son las siguientes:

- Resistencia tensil entre 3,500 a 10,000 psi (ASTM-633).
- Resistencia a la compresión entre 10,000 a 60,000 psi.
- Densidad (en volumen) entre el 94.0 a 99.5%.

La gama de aplicaciones de los procesos de micro polvos es extremadamente amplia, encontrando limitaciones sólo ante los mecanismos de desgaste por impacto y cargas puntuales elevadas. Cabe recordar que estos procesos son bastante empleados en el recubrimiento preventivo de turbinas de aviación, tanto de aeronaves comerciales como en jets de combate, por ejemplo.

Tabla IV. **Aplicaciones características de aleaciones micropulverizadas para aplicaciones en frío**

Micropolvo	Aplicación
Ni-Al-Mo	Reconstrucción dimensional en ejes para calzado de rodamientos
Ni- carburo de tungsteno	Aspas de ventiladores, chutes de descarga de finos
Ni-Cr-Al	Ejes de bombas, pistones hidráulicos
Fe-Cr-Mo	Tubos de calderas, zona supercalentadores, protección contra erosión en caliente
Cu-Al	Reconstrucción de componentes de bronce, válvulas de flujo
Al (99%)	Protección de estructuras contra corrosión atmosférica y química
Fe-C-Cr-Ni	Reconstrucción en aceros inoxidables o donde se requiere tal propiedad
TiO ₂	Cerámica ideal para proteger mangos de bombas y ejes en zona de la empaquetadura

Continúa

ZrO ₂	Cerámica refractaria para protecciones a elevadas temperaturas
------------------	--

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 107.**

3.2.4 Compuestos metálico orgánicos

Como su nombre nos da la referencia, son materiales constituidos por resinas epóxicas, las cuales en algunos casos están impregnadas con micropolvos metálicos, cerámicos y/o carburos. Estos materiales se encuentran disponibles en forma de pasta o líquidos viscosos y constan de dos partes: la resina y el endurecedor, las cuales al mezclarse reaccionan químicamente formando un compuesto de determinadas propiedades.

Las aplicaciones antidesgaste de estos materiales aumentan rápidamente a medida que se desarrollan sistemas epóxicos y elastómeros de mejores características mecánicas y se han obtenido buenos resultados en revestimientos anticorrosivos, protección contra la abrasión y erosión e incluso aplicaciones a temperaturas relativamente elevadas (aproximadamente 250 grados centígrados). Un área en donde se han empleado bastante estos sistemas la constituyen determinadas reparaciones de emergencia, siendo mayoritarias la eliminación de filtraciones en cuerpos de bombas y mecanismos óleo hidráulicos.

Cabe recordar que estos compuestos se aplican a temperatura ambiente, aunque en algunos casos es necesario fraguar en horno y no requieren energía adicional para efectuar el depósito.

Tabla V. **Resumen de las características de depósito y aplicaciones antidesgaste de los diversos procesos de recubrimiento**

Proceso	Característica	Forma de la Aleación	Velocidad de Depósito	Eficiencia de Depósito	Tasa de Dilución	Posibilidad de Automatización
Oxi – gas	Varilla oxigas	Varilla	Baja	Alta	2 – 20	No
Oxi – gas	Micro polvo para fundir	Polvo	Baja	Alta	0.1 – 2	Poca
Oxi – gas	Micro polvo en frío	Polvo	Alta	Media alta	+ 0 – 0	Si
Arco eléctrico	Arco manual	Electrodo	Media	Media	15 – 35	No
Arco eléctrico	Arco abierto	Alambre núcleo fundente	Alta	Alta	25 – 45	Si
Arco eléctrico	TIG	Varilla desnuda	Baja	Alta	2 – 20	No
Arco eléctrico	MIG / MAG	Alambre desnudo	Alta	Alta	20 – 40	Si
Otros	Compuestos órgano-metálicos	Pastas y/o pinturas epóxicas	Alta	Alta	0	No

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 109.**

Tabla VI. **Resumen de las características de depósito y aplicaciones antidesgaste de los diversos procesos de recubrimiento**

Proceso	Tipo de desgaste	Abrasión y/o desgaste	Erosión y/o cavitación	Fricción	Corrosión	Calor
Gas	Varilla oxigas	O	R	F	R	O
Gas	Micropolvo en caliente	O	O	O	O	F
Gas	Micropolvo en frío	R	O	F	F	O
Arco eléctrico	Arco manual	F	F	R	O	O
Arco eléctrico	Arco abierto	F	O	R	R	O
Arco eléctrico	TIG	R	O	O	R	O
Arco eléctrico	MIG / MAG	R	O	R	R	O
Otros	Compuestos metálico orgánicos	O	O	R	O	N.R.

F: Frecuentemente usado

O: Ocasionalmente usado

R: Rara vez usado

N.R.: No recomendado

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 110.**

4. LA TECNOLOGÍA DEL TERMOROCIADO

4.1 Historia

El termorociado o más comúnmente conocido como metalizado nació a principios del siglo veinte (20), sus primeras aplicaciones fueron para proteger contra la corrosión, con aplicaciones de zinc, sin embargo pese a existir desde aquel entonces solo después de los años sesenta (60) comenzó un fuerte desarrollo que cambió la naturaleza eminentemente de reparación que tenía el proceso y se desarrolló para lograr integrarlo al proceso productivo especialmente en partes de avión y en la industria textilera, con la consiguiente expansión en equipos, procesos y productos para realizarlo.

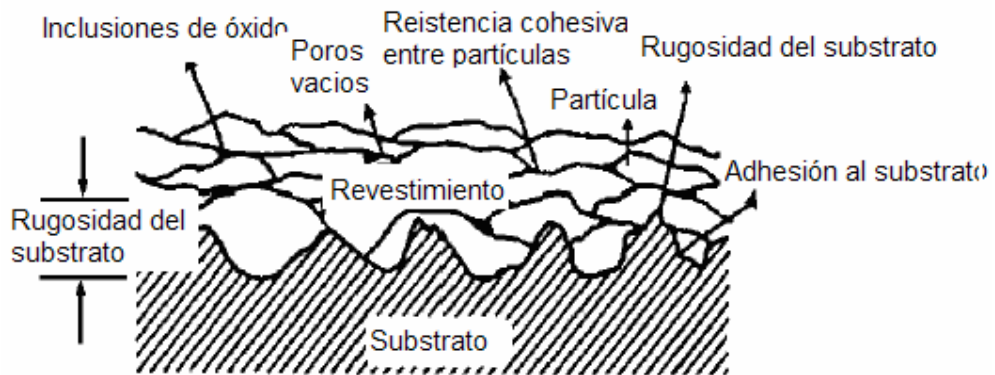
4.2 Definición

El termorociado (THSP, por sus siglas en el idioma inglés; *Thermal Spray Protection*), es un grupo de procesos mediante los cuales partículas finamente divididas de materiales metálicos o no metálicos de revestimiento son depositadas en estado fundido o semi fundido sobre un sustrato para formar un depósito termorociado. El material de revestimiento puede estar en forma de polvo, alambre, *cord* o varilla. El material a termorociar es calentado y llevado a fusión o a estado plástico mediante una fuente tal como combustión de gases, arco eléctrico, arco plasma o por la detonación de una mezcla explosiva. El material caliente es proyectado hacia el sustrato por una corriente de gases. La mayoría de los metales, cerámicas, *cerments* y compuestos duros pueden ser termorociados por alguna de las variaciones del proceso. El sustrato es generalmente

preparado por medio de granallado con óxido de aluminio o hierro blanco angular para aumentar la rugosidad de la superficie.

Cuando las partículas fundidas impactan la superficie, se aplastan formando pequeñas lentejas que se traban con las irregularidades de la superficie y entre sí. Estas lentejas se enfrían rápidamente y solidifican formando una estructura de capas que van creciendo hasta lograr la medida final deseada.

Figura 17. **Sección transversal de un recubrimiento por termorociado típico**



Fuente: **Curso de metalización. Eutectic Corporation, Pág. 3**

La liga entre el sustrato y el material de revestimiento puede ser mecánica, metalúrgica, química o una combinación de estas. En ocasiones un tratamiento térmico posterior del revestimiento aumenta la resistencia de la unión con el sustrato por difusión o reacción química con el sustrato.

La densidad del depósito depende de factores como el tipo de material, el proceso, etc., ésta es generalmente superior al 90% de la densidad del material de aporte.

4.2.1 Usos y ventajas

El termorociado se usa extensivamente en manufactura, como es el caso de la industria de aeronáutica, la cual ha desarrollado cientos de aplicaciones en las que el termorociado confiere a las superficies resistencias al desgaste y características especiales difícilmente logrables en otra forma, por otra parte la industria en general ahorra en el costo de los materiales anualmente gracias a la reconstrucción y adecuación de partes de equipos por medio del termorociado. Hoy por hoy se sabe que la mejor protección que se puede lograr contra la corrosión ambiental es mediante termorociado de zinc o aluminio acompañado de sellantes que obturan las porosidades del depósito, estos sellantes también se usan en aplicaciones en que soporta presión como es el caso de los hidráulicos de equipo pesado.

4.2.2 Limitaciones

Debido a su naturaleza laminar y a las características de la liga con el substrato, los revestimientos de termorociado tienen una serie de limitaciones desde el punto de vista de capacidad de soportar carga puntual, impacto o comportarse como barrera protectora con la corrosión. El ingeniero de diseño debe de tener en cuenta estas limitaciones y las diferencias inherentes con procesos como la soldadura de arco eléctrico ya que los revestimientos termorociados no recuperan la capacidad de transportar carga mecánica, son revestimientos que recuperan y adecuan las superficies solamente.

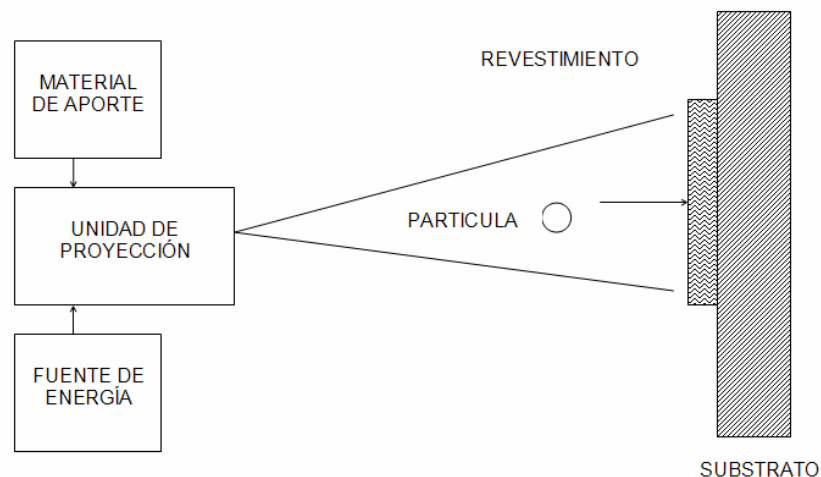
4.3 Naturaleza de los revestimientos termorociados

El éxito en el uso de los revestimientos termorociados, es dependiente de la estricta adherencia a los procedimientos específicos del proceso, cualquier desviación de estos procedimientos o la desatención al ejecutarlos

puede significar el fracaso de la reparación. Hay muchas variables que se unen e interactúan para producir el resultado final, estas son en términos generales: el material de aporte, la fuente de energía, la unidad de proyección, la velocidad de la partícula, las condiciones del sustrato, entre otras.

Simplificando al máximo podríamos decir que un sistema de termorociado corresponde al diagrama que se presenta, en donde un material de aporte es alimentado a una unidad de proyección la cual, mediante una fuente térmica, lleva el material a una temperatura de fusión o de plastificación, dependiendo de las características del material aportado, esta misma unidad de proyección produce las partículas pequeñas y las acelera proyectándolas sobre el sustrato que a su vez debe de tener unas características de limpieza, rugosidad y temperatura preestablecidas para lograr la adecuada aplicación de las partículas a la superficie.

Figura 18. **Diagrama de un sistema de termorociado**



Fuente: **Curso de termorociado. Eutectic Corporation, Pág. 4.**

4.4 Variaciones del proceso de termorociado

Como se puede observar en la figura del tema anterior, en la unidad de proyección interactúan el material de aporte y la fuente de energía para producir un chorro de partículas finas fundidas y/o plastificadas proyectadas con una velocidad determinada. La primera clasificación de los procesos de termorociado se hace basado en la fuente de energía y la segunda dependiendo del material de aporte.

4.4.1 Fuentes de energía

Las fuentes de energía de un sistema de termorociado pueden ser:

- Combustión.
- Eléctrica.

4.4.1.1 Combustión

Cuando la fuente de energía es la combustión existen dos subgrupos que son:

- Subsónica:

Los sistemas de proyección basados en combustión subsónica, generalmente usan gases tales como acetileno, propano o propileno, junto con oxígeno o simplemente aire para lograr la energía necesaria para fundir el material de aporte, el cual puede estar en forma de polvo o alambre. El empuje necesario para que la partícula logre la velocidad requerida para ser proyectada sobre el substrato es logrado con los gases de combustión. Es subsónica puesto que dichos gases de combustión solo logran impulsar la partícula a velocidades del orden de 150 a 200 m/seg. Se han usado muchos tipos de combustibles pero por razones de seguridad como en el caso del hidrógeno o por razones

de calidad del depósito los más usados son los mencionados anteriormente.

- **Hipersónica:**

Los procesos de combustión hipersónica están divididos en dos grupos, los sistemas de detonación y los sistemas continuos. Los sistemas de detonación operan bajo principios diferentes a los demás sistemas de termorociado, en ellos una mezcla de gases explosiva, normalmente acetileno y oxígeno se carga con el material de aporte en forma de polvo, el cual es fundido y proyectado sobre el substrato a través de explosiones sucesivas y rápidas en la cámara del cañón.

Los procesos supersónicos continuos usan keroseno, propileno, o hidrógeno junto con oxígeno o aire para producir una combustión continua en la cámara de combustión de la cual los gases calientes de combustión son eyectados a velocidades que superan *mach* 4, en estos gases calientes se introduce el material de aporte en forma de polvo y es proyectado con tal energía cinética que el impacto sobre el substrato produce calor adicional que contribuye a mejorar la liga y aumenta considerablemente la densidad del depósito.

4.4.1.2 Eléctrica

Los procesos que usan la corriente eléctrica como fuente de energía se pueden clasificar como:

- Arco.
- Plasma transferido.
- Plasma no transferido.

4.4.1.2.1 Arco

En el proceso de *Arc Spray* (su nombre en el idioma inglés), se usan metales y aleaciones en forma de alambre para producir un arco eléctrico continuo entre dos de ellos, que al fundirlos permite proyectar mediante un chorro gaseoso, generalmente de aire, las partículas del material de aporte al sustrato.

4.4.1.2.2 Plasma transferido

Se utiliza una pistola especial que tiene la habilidad de producir un arco plasma transferido en el cual se inyectan las partículas del material de aporte en forma de polvo, estas se funden y se ligan metalúrgicamente al sustrato.

4.4.1.2.3 Plasma no transferido

Mediante una pistola especial se crea un arco plasma entre el electrodo de tungsteno y la boquilla, el cual es usado para fundir y proyectar las partículas del material de aporte introducidas en la corriente de gases en forma de polvo. El arco no toca la pieza y la liga es básicamente por un depósito mecánico, no se logra la difusión con el sustrato.

4.4.2 Materiales de aporte

Los materiales de aporte pueden venir en diversas presentaciones: alambres tanto sólidos como tubulares, polvo, varillas y *cord* el cual es un tubo plástico lleno con polvo lo cual permite su alimentación en equipos diseñados para trabajar con material de aporte en forma de alambre.

4.5 Unidades de proyección

Las unidades de proyección para el procedimiento de termorociado las podemos dividir en:

- Equipos de combustión de baja velocidad:
 - Equipos de aspersión y fusión a gas.
 - Equipos de termorociado a gas de alambre.
 - Equipos de termorociado a gas de varilla de cerámica.
 - Equipo de termorociado a gas de polvo.
- Equipos de combustión de alta velocidad:
 - Equipos de termorociado por detonación.
 - Equipos de termorociado por combustión continua de alta velocidad.
- Equipos eléctricos:
 - Equipos de termorociado por arco eléctrico.
 - Equipos de termorociado por arco plasma.
 - Equipos de termorociado por arco plasma transferido.
 - Equipos de termorociado por arco plasma no transferido.

4.5.1 Equipos de combustión de baja velocidad

Hay varios tipos de unidades de proyección, el primer grupo es el de combustión a llama *Flame Spraying* (por su nombre en el idioma inglés), que comprende todo el grupo de equipos de baja velocidad tanto para alambre como para varilla, cord y polvo.

Un equipo de termorociado a gas consta en general de los siguientes componentes:

- Antorcha de termorociado.
- Material a depositar y su sistema de alimentación.

- Oxígeno y gas combustible, reguladores de presión y flujómetros.
- Fuente de aire comprimido y su unidad de control cuando se requiera.
- Dispositivo de soporte de la pieza a trabajar.
- Equipo de manipuleo de la antorcha o la pieza para aplicaciones automáticas o semiautomáticas.
- Anillos enfriadores de aire, aceleradores de aire o sifones.

El diseño de la antorcha es dependiente de la forma física del material a depositar (alambre, polvo, varilla, cord). Si la aplicación es automática o manual, entre otros.

Los cuatro gases más usados como combustible son: acetileno, propano, propileno y metilacetileno propadieno. El más usado es el acetileno pues no solo produce la temperatura de llama más alta al combustir con oxígeno (3,100 grados centígrados), si no que también tiene el máximo poder calorífico (1,470 BTU/pie³) teniendo además la facilidad de permitir el ajuste de la llama lo cual no ocurre con los otros gases. El propano y ocasionalmente el hidrógeno se usan para aplicar materiales de bajo punto de fusión como aluminio, zinc y babbitt.

Dada la importancia de poder reproducir las aplicaciones de termorociado, y debido a la directa relación de la calidad del depósito con el balance de cantidad de material de aporte, energía suministrada por la antorcha, casi todos los equipos usan controles de presión y caudal tanto para el gas combustible como para el oxígeno, para garantizar la reproducibilidad y control de las condiciones de la llama. Esto se logra mediante reguladores de presión y flujómetros.

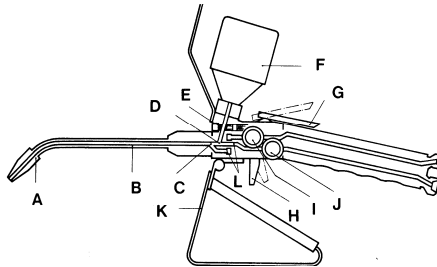
Varios de los equipos de termorociado a gas usan aire comprimido, bien sea para atomizar y producir las partículas finas o para acelerar la llama

por medio de las boquillas. Esto hace mandatorio que este aire este limpio y seco, y su calidad es en muchas ocasiones el factor más importante en la calidad del depósito, un aire con aceite o humedad producirá inestabilidad en la llama y por lo tanto defectos en la calidad del depósito. En general se usan filtros y desecantes químicos para lograr la calidad de aire adecuada, los controles de presión y flujo de aire son vitales para lograr unas condiciones de operación estables.

4.5.1.1 Equipos de aspersión y fusión a gas

Los equipos de aspersión y fusión a gas, *Spray and Fuse* (por su nombre en el idioma inglés), funcionan con una mezcla de acetileno y oxígeno como fuente de energía y el material de aporte en forma de polvo. Una pequeña cantidad del oxígeno es desviada a un vénturi para producir la succión necesaria para introducir el polvo desde un depósito colocado en la misma antorcha, esta alimentación es controlada con una válvula manual. El polvo es arrastrado por los gases a través de la boquilla hasta llegar al cono de la llama donde debido a su pequeño tamaño (*mesh* 140) se funde y alcanza la pieza la cual debe de precalentarse por la misma llama produciéndose una liga completamente metalúrgica y con unas características muy similares a las de la soldadura a gas. Los diferentes tamaños de boquilla permiten lograr un control excelente de la geometría de los depósitos, esto hace que sea un proceso ampliamente utilizado en la reconstrucción de moldes principalmente en la industria del vidrio.

Figura 19. **Esquema básico de un equipo de aspersión y fusión a gas**



A: Boquilla, B: Mezclador, C: Ingreso polvo, D: Vénturi, G y E: Válvula manual, F: Deposito de material a proyectar, H: Válvula de seguridad, I: Válvula de Acetileno, J: Válvula de Oxígeno, K: Protección térmica para manos, L: Válvula de mezcla

Fuente: **Manual equipo *Eutalloy*. *Eutectic Corporation*. Pág. 4.**

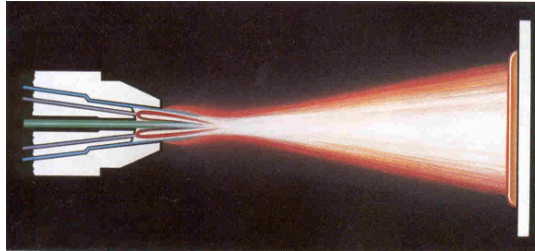
Las aleaciones utilizadas están en dos grupos principales, a base de Ni (níquel) con Cr (cromo), B (boro), Si (silicio), que son las más utilizadas y que tienen rangos de dureza de 18 HRC (HRC, dureza en escala *Rockwell C*, por sus siglas en el idioma inglés) hasta 65 HRC, en algunos casos y para aplicaciones en la industria petrolera se añade carburo de tungsteno para aumentar su resistencia a la abrasión y a la erosión. El otro grupo de aleaciones es a base de cobalto y es usado en general en aplicaciones que requieran resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas.

4.5.1.2 Equipos de termorociado a gas de alambre

En estos equipos un alambre metálico continuo, generalmente sólido, aun cuando hoy día hay algunas presentaciones de alambre tubular, es alimentado a la antorcha en una forma estable y continua mediante un alimentador casi siempre integrado con el conjunto de la antorcha. El sistema de alimentación motorizado puede usar un motor neumático o un motor eléctrico. El alambre es alimentado por el centro hasta alcanzar la llama, la cual se produce por la combustión del gas combustible (generalmente acetileno) con oxígeno, esta llama concéntrica al alambre

funde su punta, la cual es atomizada tanto por los gases de combustión como por la corriente de aire de atomización de alta presión que circunda la llama, proyectando las partículas fundidas sobre la pieza.

Figura 20. **Esquema de un equipo de termorociado a gas de alambre**



Fuente: **Curso termorociado (metalización). Eutectic Corporation, Pág. 6**

Las variables de este proceso son flujo y presión de gases; flujo y presión de aire; velocidad de alimentación y diámetro del alambre. La alimentación estable del alambre es vital en la calidad del depósito pues si es demasiado alta las partículas serán demasiado grandes y se tendrá una excesiva porosidad y falta de densidad del depósito, a su vez si ésta es muy baja las partículas se oxidarán y se corre el riesgo de la fusión del alambre en la boquilla. En general los depósitos con este equipo tiene un alto contenido de óxidos.

Los equipos varían en tamaño, desde equipo manuales, usados en una forma muy similar a las pistolas de pintura y usados para aplicar protecciones anticorrosivas de zinc y aluminio, hasta unidades de altas tasas de depósito totalmente automatizadas.

4.5.1.3 Equipos de termorociado a gas de varilla de cerámica

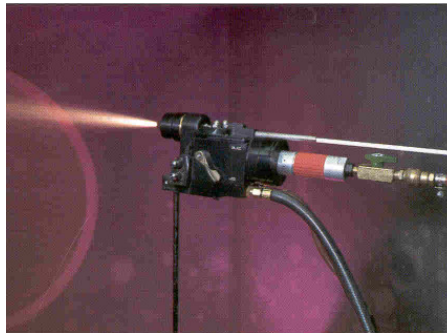
El equipo de termorociado a gas de varilla cerámica *Ceramic Rod Flame Spraying* (su nombre en idioma inglés), podría considerarse una

variación del equipo de termorociado a gas de alambre, la diferencia más importante es la presentación del material de aporte, el cual viene en varillas, casi la totalidad de estos materiales de aporte en esta presentación son cerámicas. Debido a los altos puntos de fusión y baja conductividad térmica de estos materiales, el control de la alimentación es de alta importancia en estos equipos. La punta de la varilla se deshace en la llama y las partículas plastificadas semihundidas son proyectadas sobre el substrato, como estos materiales no logran la fusión en la llama, si no solo se plastifican, la rugosidad adecuada en el substrato es de máxima importancia para lograr una liga adecuada.

Los materiales más frecuentemente depositados son:

- Alumina titania.
- Alumina.
- Zirconio.
- Óxidos de tierras raras.
- Silicato de zirconio.
- Zirconio de magnesio.
- Titanio de bario.
- Óxido de cromo.
- Magnesia alumina.
- Mulite.
- Titaniato de calcio.

Figura 21. **Equipo de termorociado a gas de varilla de cerámica**



Fuente: **Curso termorociado (metalización). Eutectic Corporation, Pág. 8.**

Cada material cerámico tiene sus propias características, ventajas y limitaciones pero en general se seleccionan basados en sus buenas características:

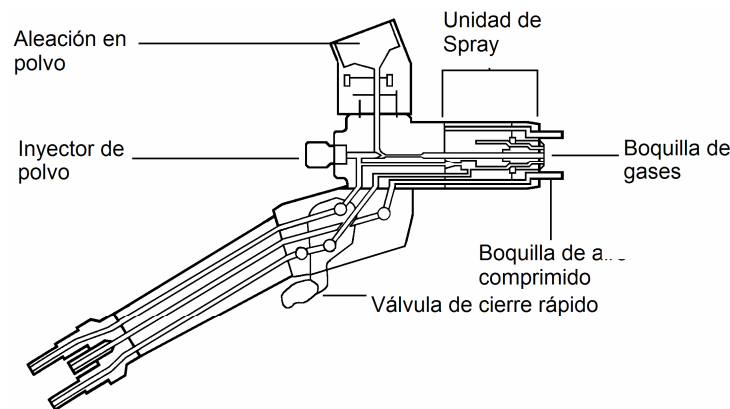
- Buena adherencia a una variedad de sustratos
- Se aplican económicamente en espesores controlados
- Buenas propiedades físicas y químicas
- Baja conductividad eléctrica y térmica
- Alta resistencia al desgaste
- Buenas características de acabado
- Alta resistencia a la temperatura

4.5.1.4 Equipo de termorociado a gas de polvo

En el equipo de termorociado a gas de polvo *Powder Flame Spraying* (por su nombre en el idioma inglés), el material de aporte es suministrado en forma de polvo y es alimentado a la pistola desde un depósito colocado en una parte superior de esta y aspirado por la succión creada por parte del oxígeno al pasar por un vénturi, o desde un alimentador externo, el cual fluidiza el polvo y lo alimenta a la antorcha a través de una manguera. El polvo es transportado hasta la llama donde se funde y es proyectado hacia

el sustrato por los gases de combustión y en algunos casos con la ayuda de aceleradores o *jets* de aire que aumentan la velocidad de las partículas.

Figura 22. **Equipo de termorociado a gas de polvo**



Fuente: **Curso termorociado (metalización). Eutectic Corporation, Pág. 10.**

Los equipos de termorociado a gas de polvo están diseñados para ser bastante portátiles, el costo inicial de su instalación es bajo comparado con otros sistemas, y tienen la posibilidad de aplicar un rango muy amplio de aleaciones tanto metálicas, como cerámicas, metales blandos (babbitt), aluminio, zinc, aleaciones auto fundentes e inclusive plásticos. En general su uso está diseñado para adecuar superficies para soportar formas específicas de desgaste y para restaurar dimensionalmente partes que se hayan desgastado.

Existe la posibilidad de aplicar en diámetros interiores y en general es un proceso versátil. Debido a la baja velocidad de la partícula lograda con estos equipos sus depósitos son porosos con baja densidad relativa y tienen menos adherencia que la que se logran con procesos de mayor velocidad de partícula. Sin embargo su versatilidad y facilidad de operación los ha hecho altamente apreciados en labores de mantenimiento.

4.5.2 Equipos de combustión de alta velocidad

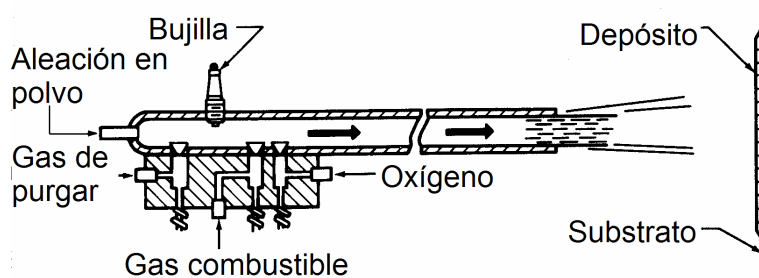
Los equipos de combustión de alta velocidad se dividen en dos familias, los equipos de detonación y los equipos de combustión continua.

4.5.2.1 Equipos de termorociado por detonación

Este es un proceso bastante diferente a los demás procesos de termorociado, en el cual en una antorcha especial, se usa la energía producida por la explosión de la mezcla de oxígeno y acetileno en lugar de una combustión continua, para disparar las partículas de material de aporte en forma de polvo hacia el sustrato logrando su plastificación tanto por la energía térmica de la explosión como por la altísima energía cinética que le es conferida a las partículas, las cuales al impactar sobre el sustrato producen un depósito de alta densidad y alta adherencia.

La antorcha o pistola consiste en un barril largo en el cual se introduce una mezcla de oxígeno, acetileno y partículas de polvo en suspensión en nitrógeno. La mezcla de oxígeno y acetileno se hace explotar por medio de una bujía varias veces por segundo, creando una serie de ondas de choque controladas que aceleran y calientan las partículas de polvo a medida que ellas avanzan por el barril. Las partículas de polvo salen de este a velocidades de 760 m/seg. Después de cada explosión el barril es purgado con nitrógeno, las sucesivas explosiones a una tasa de varias por segundo, permite construir el depósito del revestimiento al espesor deseado.

Figura 23. **Equipo de termorociado por detonación**



Fuente: **Curso termorociado (metalización). Eutectic Corporation, Pág. 11.**

Se logran temperaturas de hasta 3,300 grados centígrados dentro del barril, pero la pieza raras veces supera los 150 grados centígrados de temperatura, los espesores se pueden obtener entre 50 y 500 micras.

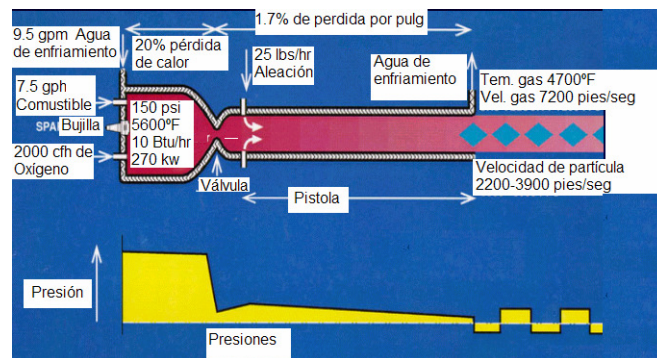
Este es un proceso automático que debido a los niveles de ruido que genera se debe realizar en una cabina aislada, produce depósitos básicamente libres de porosidad y con un alto grado de adhesión al substrato.

4.5.2.2 Equipos de termorociado por combustión continua de alta velocidad

Recibe también los nombres de HVOF por su nombre en idioma inglés *High Velocity Oxi Fuel*, HP-HVOF (*High pressure*, HVOF cuando el combustible keroseno, es inyectado a la cámara la cual se mantiene por encima de 60 psi) y HVOF *High Velocity Air Fuel*. Estos equipos son equipos diseñados para trabajar en una forma parecida a la pistola de detonación pero en una forma continua, aquí se carga en forma continua el combustible, el cual puede ser hidrógeno, acetileno, propileno o líquidos como keroseno; adicionalmente se carga el comburente también en forma continua, este es normalmente oxígeno o aire en los equipos de más reciente diseño, esta mezcla se mantienen permanentemente encendida por medio de una bujía, creándose una fuente de combustión estable, los gases

calientes son restringidos en la salida de la cámara de combustión para producir su aceleración a velocidades supersónicas (900m/seg) en el cañón de salida se inyecta el polvo dentro de la corriente de gases saliente, allí las partículas se calientan y se aceleran para impactar plastificadas al sustrato a muy alta velocidad.

Figura 24. **Equipo de termorociado por combustión continua de alta velocidad**



Fuente: **Curso termorociado (metalización). Eutectic Corporation, Pág. 13.**

Los depósitos producidos por estos equipos son similares a los producidos por la pistola de detonación logrando las máximas densidades y las máximas adhesiones. Debido a su tamaño y al nivel de ruido que generan se operan en cabinas cerradas y generalmente en aplicaciones mecanizadas.

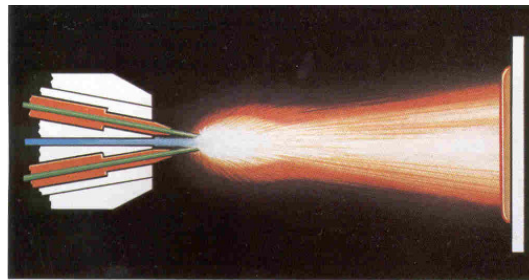
4.5.3 Equipos eléctricos

4.5.3.1 Equipos de termorociado por arco eléctrico

También conocido por su nombre en el idioma inglés *Arc Spray*, estos equipos consisten básicamente en una fuente de soldadura, generalmente de voltaje constante y alto ciclo de trabajo, un sistema de alimentación con motor eléctrico o neumático, casi siempre adosado a la antorcha

propiamente dicha, en la cual son alimentados dos alambres que pueden ser sólidos o tubulares, los cuales al encontrarse forman un arco eléctrico que funde sus puntas, las cuales son atomizadas por medio de un chorro de gas, casi siempre aire a presión.

Figura 25. **Equipo de termorociado por arco eléctrico**



Fuente: **Curso termorociado (metalización). Eutectic Corporation, Pág. 15.**

Las temperaturas del arco exceden el punto de fusión del material de aporte, durante el proceso de fusión el metal es sobrecalentado al punto que alguna volatilización puede ocurrir, esto es especialmente cierto con las aleaciones de aluminio y zinc. La alta temperatura de las partículas produce zonas de interacción metalúrgica o de difusión, o ambas, después de su impacto con el substrato. Estas reacciones localizadas producen micro soldaduras con buena cohesión y adhesión, generando revestimientos con excelente unión.

Las tasas de depósitos logrables por termorociado al arco, son apreciablemente superiores a las obtenidas con termorociado a gas y sus adhesiones son bastante superiores, siendo solo superadas por los sistemas de alta velocidad como el HVOF. Las variables del proceso son el amperaje, la velocidad de alimentación y la presión y flujo del gas atomizador.

Como ya se mencionó se utilizan fuentes de soldadura de corriente directa, voltaje constante, las cuales energizan uno de los alambres como

positivo (ánodo) y el otro como negativo (cátodo). La punta del cátodo se calienta más que la del ánodo, y por lo tanto funde más rápidamente, por lo tanto las partículas desprendidas del cátodo son más finas que las desprendidas del ánodo, si los dos alambres son del mismo diámetro.

Una fuente de soldadura con rango de 18 a 40 voltios, permite operar casi todo el universo de aleaciones de este tipo. La apertura del arco aumenta al aumentar el voltaje con un aumento consiguiente del tamaño de partícula, por esto se busca mantener el voltaje al mínimo posible que garantice una operación estable del equipo. La excepción es el llamado pase de base o de liga, en el cual a propósito se aumenta el voltaje y se disminuye el flujo de gas atomizante para lograr partículas más grandes que al ser aplicadas a distancias de antorcha menores generan una mejor adhesión, después de aplicada esta capa base se restituyen los parámetros de operación normal.

La operación de estos equipos es muy económica, y tienen una buena versatilidad, aún cuando la inversión de capital inicial es más alta que la de los equipos de combustión, su capacidad tanto operacional como de rango de aleaciones también es menor, sus bajos costos de material de aporte y de operación han hecho que día a día este proceso gane mas adeptos.

4.5.3.2 Equipos de termorociado por arco plasma

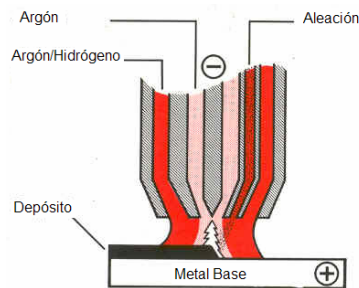
Los equipos de arco plasma, como su nombre lo indica trabajan básicamente utilizando antorchas que generan un arco plasma, se clasifican en dos subgrupos los de plasma transferido (PAT por sus siglas en el idioma inglés *plasma arc transferid*) en el cual el arco eléctrico se establece entre el electrodo de tungsteno en la antorcha y la pieza a trabajar, y los de plasma no transferido en los cuales el arco eléctrico se produce entre el electrodo de tungsteno y la boquilla sin tocar la pieza. En ambos casos el material de aporte esta en forma de polvo.

4.5.3.2.1 Equipos de termorociado por arco plasma transferido

El término arco plasma, es usado para describir una familia de procesos para trabajar metales que comprende termorociado, soldadura por fusión y revestimiento así como corte. Todos ellos usan la contricción del arco para producir energía térmica de alta densidad. La contricción del arco es lograda forzando el arco eléctrico a través de un orificio. Durante el calentamiento, el gas acompañante es parcialmente ionizado formando el plasma. En el procedimiento por plasma transferido, el arco se forma entre el electrodo de tungsteno de la antorcha y el substrato, la corriente de plasma acompaña el arco y calienta muy rápidamente la superficie del substrato hasta fundirla muy superficialmente, dentro de la corriente de gases de protección del arco plasma se introduce el material de aporte en forma de polvo el cual al entrar en la corriente plasma se funde y se deposita sobre la superficie en forma muy similar a un proceso de soldadura por fusión. Debido a la altísima temperatura del arco plasma es posible avanzar muy rápidamente logrando penetraciones mínimas en el substrato. En general las aplicaciones realizadas con estos equipos son aplicaciones automatizadas, en válvulas y sus componentes o partes de moldería en la industria de vidrio, sin embargo existen antorchas para operación manual.

Las aleaciones usadas son en general del mismo estilo de las utilizadas en el termorociado a gas de aleaciones fusibles. Este proceso se usa en la fabricación de elementos de válvulas y tornillos sinfín como los usados en la extrusión e inyección de plásticos.

Figura 26. **Equipo de termorociado por plasma transferido**



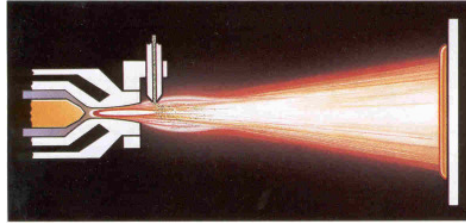
Fuente: **Curso termorociado (metalización).** *Eutectic Corporation*, Pág. 17.

4.5.3.2.2 Equipos de termorociado por arco plasma no transferido

A diferencia del PAT (arco plasma transferido) el proceso de termorociado por arco plasma no transferido, forma el arco entre el electrodo de tungsteno de la antorcha y la boquilla restrictora, el sustrato no forma parte del circuito eléctrico. El polvo es introducido en la corriente de plasma que sale eyectada de la boquilla donde las partículas se funden y son proyectadas al sustrato. La temperatura de la corriente de plasma puede llegar a los 8,300 grados centígrados por lo que es posible fundir tanto materiales metálicos como no metálicos, en especial los cerámicos los cuales son ampliamente aplicados con este proceso con el cual se logran las máximas calidades de aplicación de materiales refractarios y con altos puntos de fusión.

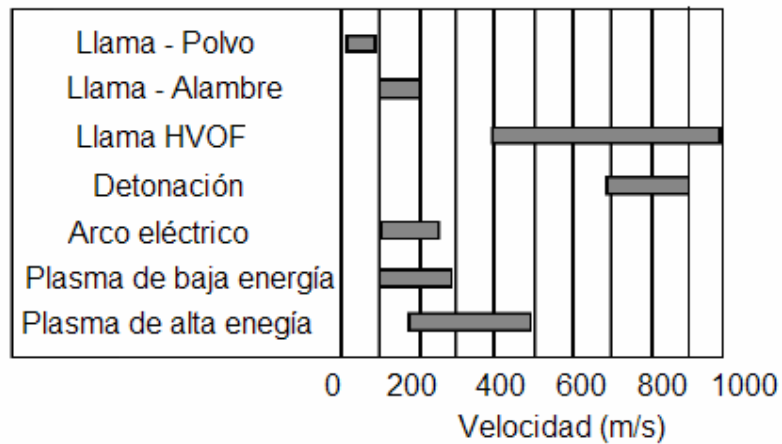
Los equipos constan de una fuente de soldadura, generalmente de corriente directa del tipo de voltaje constante, una consola de control, una antorcha para generar el arco plasma y un alimentador de polvo para introducir este en la corriente de gases. Estos equipos se operan tanto manualmente como automáticamente, su más amplia utilización esta en la industria aeronáutica y en la industria textil.

Figura 27. **Equipo de termorociado de arco plasma no transferido**



Fuente: **Curso termorociado (metalización).** *Eutectic Corporation*, Pág. 19.

Figura 28. **Velocidad de las partículas en los diferentes tipos de termorociado**



Fuente: **Material de apoyo, curso termorociado (metalización).**
Eutectic Corporation

5. PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL TERMOROCIADO EN FRÍO

El sistema de aplicación de polvos por termorociado en frío aplica recubrimientos de aleaciones metálicas resistentes al desgaste a piezas metálicas. Es empleado para reconstruir partes desgastadas, para corregir errores de maquinado, para aplicar protección dura resistente al desgaste a piezas baratas, fáciles de maquinar, para incrementar sensiblemente su vida en servicio.

El proceso de termorociado en frío recibe este nombre debido a que los revestimientos metálicos que se aplican a las piezas mantienen un rango de temperaturas que oscila entre 100 y 260 grados centígrados, por lo que las piezas permanecen relativamente frías, hay muy poca oportunidad de que se presenten distorsiones o cambios metalúrgicos, lo cual nos hace caer en cuenta que la unión del material que utilizamos para recubrir el sustrato tiene una unión puramente mecánica, totalmente lo contrario al procedimiento de termorociado en caliente, donde la unión es metalúrgica.

Para poder hacer una aplicación correcta se necesita de los siguientes equipos:

- Un tanque de acetileno con regulador y monitor.
- Un tanque de oxígeno con sus respectivos controles.
- Crayón térmico de 100°C.
- Crayón térmico de 300°C.
- Herramienta de carburo para corte a 90°.
- Un torno si la parte que se va a recubrir es cilíndrica.
- Equipo para granallado (recomendado).

- Un esmerilador.
- Desengrasante no inflamable, para la limpieza de la pieza.
- Grasa no inflamable, para proteger el área que no queremos recubrir.
- Sellador para mejorar las operaciones de acabado.
- Lija para acabado.
- Chispero.

Se puede decir que el procedimiento de recubrimiento de una aleación resistente al desgaste es tan simple como:

- Limpiar la parte y preparar la superficie.
- Aplicar el recubrimiento.
- Mecanizas hasta el tamaño deseado y rugosidad necesaria.

Pero para poder tener éxito en esta aplicación por mas sencilla que parezca se necesita tomar en cuenta los temas que se presentan a continuación.

5.1 Preparación del área a recuperar

Los recubrimientos por termorociado deben de mostrar una buena adhesión con el metal base (substrato). Durante el proceso de proyección en frío, dicha adhesión se consigue principalmente por medio de adhesión mecánica, existiendo un pequeño componente de microsoldadura. Durante los procesos de proyección y fusión posterior, la presencia de impurezas (tales como óxidos) del substrato pueden perjudicar el proceso de cohesión metalúrgica. Por esta razón es importante limpiar esmeradamente el substrato. La superficie debe asimismo mostrar la rugosidad adecuada.

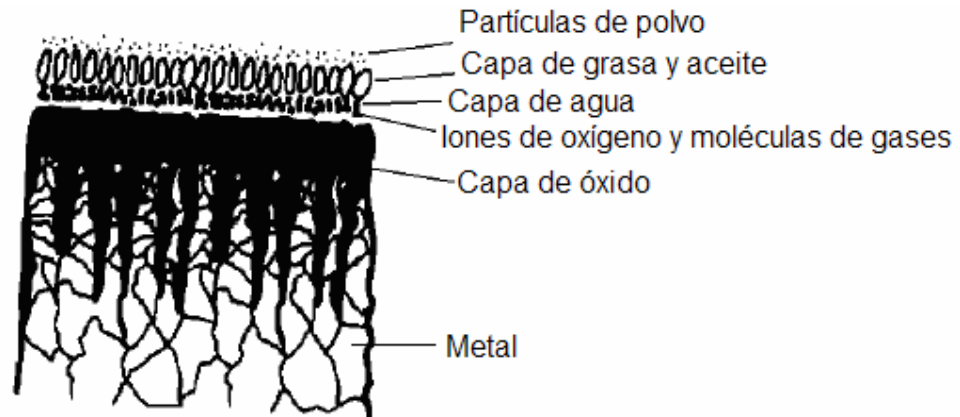
5.1.1 Limpieza

Debe eliminarse todo resto de pintura, óxido o corrosión por medio de un rascador o un cepillo metálico.

Precalentar la pieza de trabajo a recubrir hasta justo por encima de la temperatura ambiente para eliminar la condensación. Las piezas de fundición muy contaminadas deben ser precalentadas a 200°C para eliminar restos de aceite o grasa.

Limpiar o desengrasar esmeradamente tanto la pieza a recubrir como la zona adyacente. Utilizar una solución desengrasante adecuada. Los solventes sólo deben ser empleados de acuerdo con las normas de seguridad, por parte de empleados cualificados en un lugar bien ventilado. Secar únicamente con aire comprimido limpio y seco. Extremar las precauciones a la hora de manipular piezas una vez hayan sido limpiadas, a fin de no contaminarlas, ya que una simple marca de nuestra huella dactilar puede afectar totalmente la aplicación. Hay que tener muy en cuenta que las superficies metálicas limpias, expuestas al aire atmosférico, pueden existir solamente por un periodo de tiempo muy corto (fracción de minutos). Las superficies metálicas expuestas al aire atmosférico adquieren rápidamente una película de óxido, sobre la cual se depositan capas de agua, grasa, aceites, polvo y gases, a este conjunto de contaminantes se le llama superficie real.

Figura 29. **Superficie metálica real contaminada**

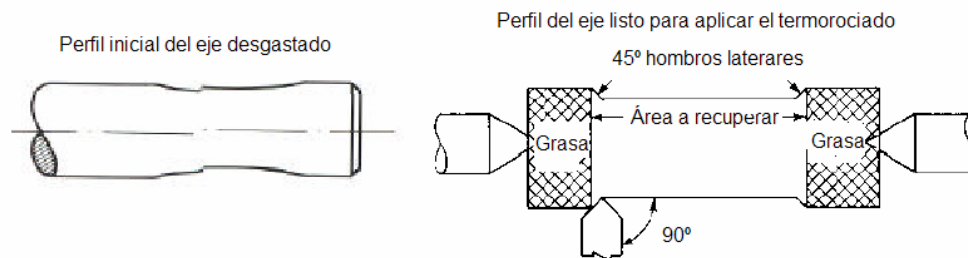


Fuente: **Material de apoyo, curso termorociado (metalización).**
Eutectic Corporation

5.1.2 Mecanizado preliminar

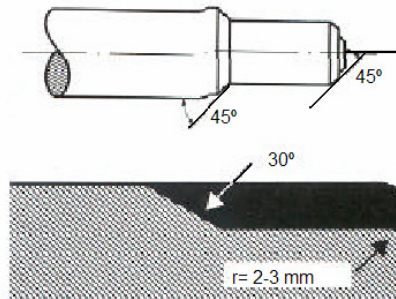
La zona a recubrir debe mecanizarse para eliminar fragmentos de metal fatigado e irregularidades ocasionadas por el desgaste. Los ejes deben achaflanarse, como se muestra a continuación.

Figura 30. **Descripción del eje desgastado y perfil tras mecanizado de la zona desgastada**



Fuente: **Manual equipo Rototec 1A. Eutectic Corporation, Pág. 5.**

Figura 31. **Vista de mecanizado de un eje cuando el desgaste se presenta en un extremo del mismo y vista después de aplicado el termorociado**



Fuente: **Manual equipo Rototec 1A. Eutectic Corporation, Pág. 8.**

Normalmente el mecanizado se realiza con una herramienta de corte, no utilizar ningún lubricante.

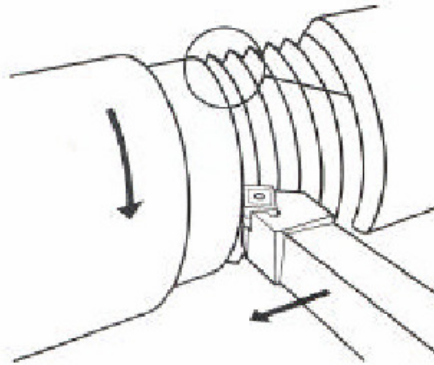
5.1.3 Rugosidad superficial

Se pueden emplear varios métodos para obtener una superficie adecuadamente rugosa para maximizar la fuerza de adherencia, como son el roscado basto, rectificado y chorreo de granalla.

5.1.3.1 Roscado basto

Se emplea normalmente para superficies cilíndricas. Tras el mecanizado preliminar la adherencia de la superficie puede aumentarse mediante una rápida pasada con una herramienta de corte, con un avance configurado en 0.7 mm por revolución y hasta una profundidad de corte de 0.35 mm, se obtiene una superficie debidamente roscada. No utilizar ningún lubricante. No se recomienda dicha técnica en caso de recubrimientos de menos de 0.50 mm de espesor.

Figura 32. **Roscado basto**



Fuente: **Manual equipo Rototec 1A. Eutectic Corporation, Pág. 10.**

5.1.3.2 Rectificado

Este método puede utilizarse tanto para proyecciones en frío como para los procesos posteriores de fusión (en caliente). Preparar la zona a tratar con una amoladora de disco o con corta piedras (*Roto Grind*). Procurar evitar contaminar la superficie con materiales recogidos por la rectificadora durante sesiones anteriores.

Figura 33. **Rectificado con amoladora de disco**



Fuente: **Fotografía tomada en el trabajo de campo**

5.1.3.3 Chorreo de granalla

Este método resulta muy eficaz si la granalla utilizada no ha sido contaminada en operaciones anteriores.

El aire comprimido utilizado debe ser limpio y seco. Se recomienda el óxido de aluminio y limaduras de hierro. La rugosidad obtenida por este método esta directamente relacionada con el tamaño de grano de las partículas y la presión del aire. Las partículas gruesas proporcionarán una superficie más rugosa y mejor adherencia, pero el acabado del recubrimiento será también más rugoso.

La presión del chorreado debe ser lo suficientemente bajo como para reducir al mínimo el empotramiento de partículas en el sustrato, particularmente en el caso de óxido de aluminio. Después del proceso de chorreado, la pieza de trabajo debe ser limpiada para eliminar restos de polvo.

Figura 34. **Equipo para chorreo de granalla**



Fuente: **Catálogo 802, Spraymaq, S. A. de C. V. México, D. F., Pág. 167.**

5.2 Protección de zonas adyacentes

Las zonas adyacentes que no se quieran recubrir con la aleación que vamos a aplicar se deben proteger con una solución especial, aplicada con

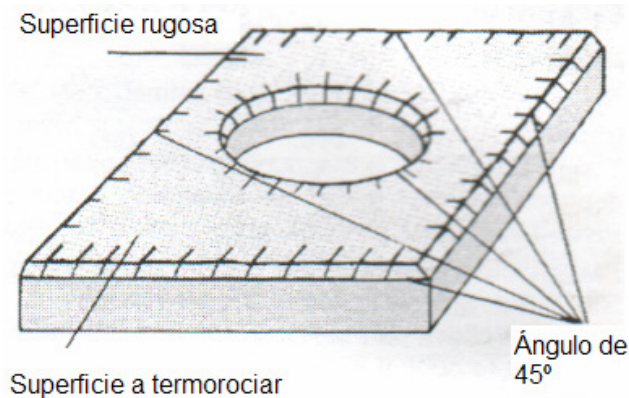
una brocha, la cual al finalizar la aplicación no deja que se adhiera a esta superficie el polvo termorociado, levantando el exceso en la zona con una espátula o con un cepillo de alambre.

Algo que se tiene que tener muy en cuenta es que después de preparar la superficie, se recomienda que la pieza de trabajo se recubra tan pronto como sea posible para evitar su oxidación o contaminación. Si la pieza de trabajo se contaminara por cualquier razón, debe de repetirse el procedimiento de limpieza antes mencionado.

Para la aplicación en piezas planas se debe de tener en cuenta además de lo mencionado en la sección de limpieza lo siguiente:

- Achaflanar todos los extremos a un ángulo de 45° .
- Dejar lo más rugosa que se pueda la superficie, se puede utilizar una amoladora de disco.
- Hacer muescas en los bordes de la pieza plana con una sierra.
- Eliminar todas las erupciones que tenga la superficie plana para una buena aplicación.

Figura 35. **Aplicación de termorociado para una pieza plana**



Fuente: **Catálogo Rototec 1A. Eutectic Corporation, Pág. 15.**

5.3 Aplicación de recubrimiento en polvo

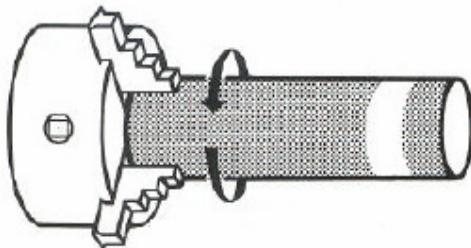
Los pasos que se deben de seguir para la aplicación del recubrimiento en polvo son:

- Preparar la superficie como se trato en el tema anterior.
- En caso de superficies cilíndricas, colocar la pieza de trabajo en un torno.
- Precalentar suavemente la pieza de trabajo hasta 40°C por encima de la temperatura ambiente.
- Aplicar el polvo con el equipo de proyección seleccionado.
- Post calentar suavemente la pieza de trabajo hasta 200°C uniformes en toda la pieza de trabajo para liberar tensiones residuales.

5.3.1 Selección de parámetros para proyecciones en torno

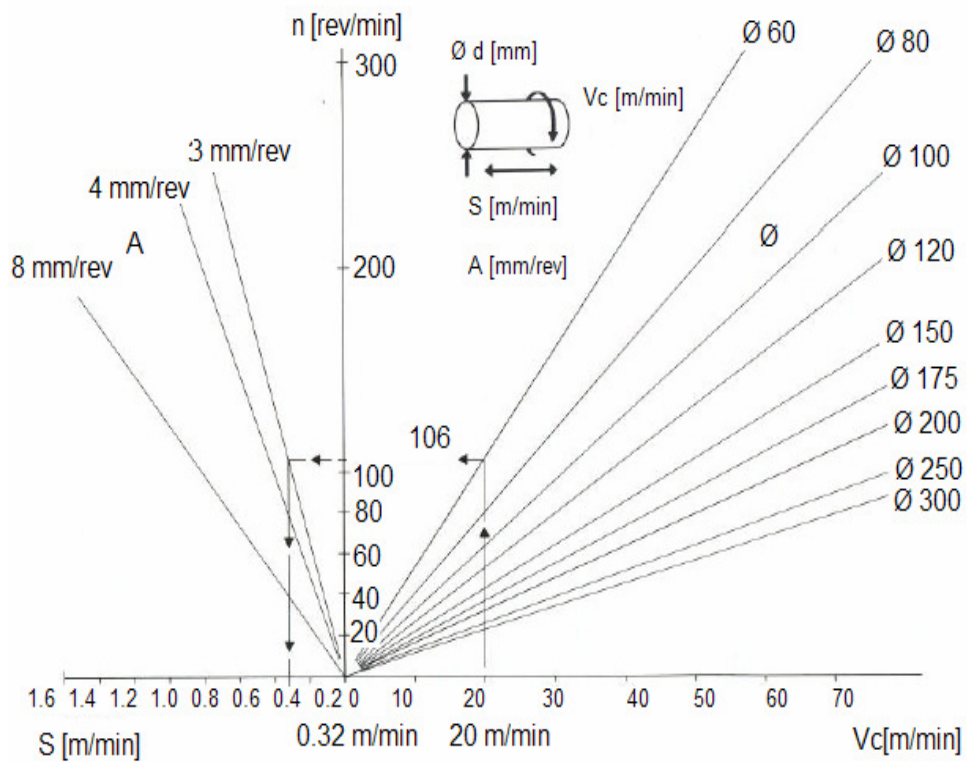
Cuando la pieza es cilíndrica se requiere el uso de un torno o de un mecanismo que gire nuestra pieza a recuperar, la gráfica que se muestra nos dan los principales parámetros para la aplicación de nuestro recubrimiento.

Figura 36. **Aplicación de recubrimiento para piezas cilíndricas**



Fuente: **Manual equipo Rototec 1A. Eutectic Corporation, Pág. 16.**

Figura 37. **Relación entre el diámetro de la pieza de trabajo y las velocidades de giro y avance**



Fuente: **Manual de equipo Castodyn DS 8000. Eutectic Corporation, Pág. 10.**

Con la información del diámetro de la pieza, se puede encontrar fácilmente tanto la velocidad de rotación del torno, como la de avance del equipo de termorociado (cuando se monta en el carro del torno para hacer una aplicación automática).

5.3.2 Temperatura de precalentamiento

La pieza debe de recibir un precalentamiento antes de aplicar el revestimiento en polvo, de por lo menos unos 40°C por encima de la temperatura ambiente, esto se hace con la intención de que cuando se proyecte el polvo plastificado no exista un choque térmico entre la pieza de trabajo (substrato) y la partícula plastificada de polvo proyectada, además el precalentamiento uniforme de la pieza nos ayuda a eliminar óxidos y contaminantes que puedan quedar remanentes del procedimiento de limpieza realizado.

5.3.3 Temperatura de trabajo de la pieza

La temperatura de trabajo de la pieza no debe superar los 200-250°C durante todo el proceso de proyección. Para evitar el recalentamiento, se puede esperar entre pasadas para permitir algún tiempo de enfriamiento natural. Sin embargo no es recomendable que la temperatura de la pieza de trabajo regrese hasta la temperatura ambiente debido a que se puede producir un agrietamiento del revestimiento por el cambio de temperatura, en este paso es de mucha utilidad los crayones de cera térmica, se hace una marca en la pieza y la cera se derrite al llegar a la temperatura a la cual están diseñados, o mejor aún mediante un medidor láser de temperatura. No se recomienda utilizar medidores por termocupla o termómetros normales porque el contacto con la pieza puede contaminar el área que previamente se ha limpiado y que se recuperará.

5.4 Acabado superficial de la pieza

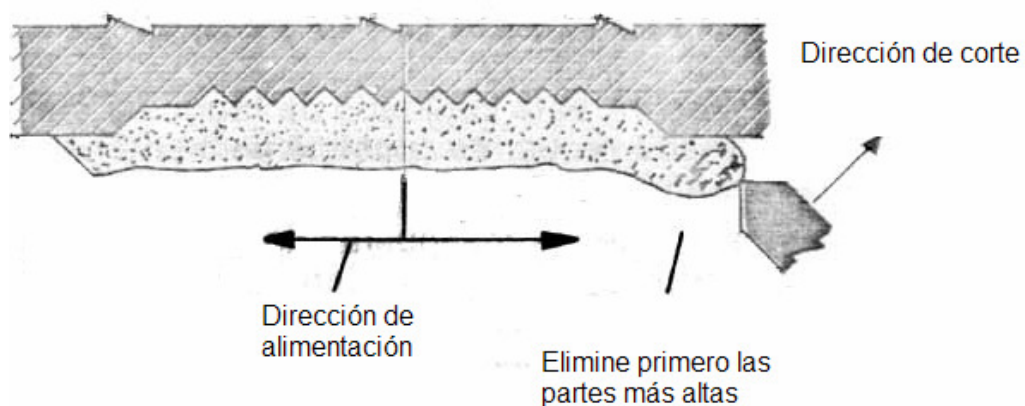
La mecanizabilidad de los recubrimientos se determina a partir de la estructura y dureza de los mismos. Las mejores herramientas para el mecanizado de la mayoría de los recubrimientos son de carburo de tungsteno (tipos ISO K 01, ISO K 10).

Las herramientas de corte fabricadas con nitruro de boro proporcionan acabados de alta calidad, y deberían utilizarse para el mecanizado de recubrimientos que contienen partículas duras.

Para el mecanizado final se debe de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Use herramientas de tungsteno afiladas.
- Elimine primero las partes altas (los flamazos en los extremos de las partes recubiertas).
- Use un ángulo de ataque de 45° para remover las partes altas o los recubrimientos indeseables.
- Maquine del centro a los extremos.
- Emplee aceite soluble o aceite de corte cuando se requiera.
- Nunca ejerza presión en una dirección que cause el levantamiento del recubrimiento.

Figura 38. **Corte de la pieza de trabajo para visualizar el maquinado al terminar la proyección de polvo**



Fuente: **Manual de equipo Rototec 1A. Eutectic Corporation, Pág. 20.**

5.5 Salud e higiene

Como seguridad en todo proceso en que se utilice oxígeno y acetileno se debe de tener en cuenta lo siguiente:

- Conectar el oxígeno al soplete antes de conectar el acetileno (no dejar nunca que el acetileno fluya por el soplete sin oxígeno).
- Verificar los cheques para el retroceso de llama, si estos fallaran cerrar inmediatamente la palanca de cierre rápido y desconectar los gases.
- Los cilindros de gas deben ser manipulados con cuidado. Deben ir protegidos contra los impacto y no deben calentarse. No engrasar ni aplicar aceite a los manómetros ni el grifo.
- La zona debe disponer de una buena ventilación para que los operarios no inhalen humos. Si la ventilación fuera inadecuada, los operarios deben utilizar mascarillas que protejan la boca y la nariz.
- Los operarios deben llevar ropa protectora y protectores tintados para los ojos.
- Consultar la hoja de datos técnicos correspondiente al material utilizado para informaciones relativas al uso correcto de éste.
- Se deben respetar las normas locales de la empresa.

Además de los puntos anteriores se debe de tener en cuenta que el equipo de protección individual de los operadores de termorociado es similar al de los soldadores. Cascos, caretas y/o gafas se deben usar para la protección de los ojos, rostro y cuello durante la operación, estas están descritas en ANSIZ87.1 Y Z89.2. Placas filtrantes apropiadas deben proteger los ojos de excesivas radiaciones ultravioleta, infrarrojo, luminosidad visible intensa y partículas proyectadas. El calzado de seguridad tipo bota preferiblemente aislante. Ropas adecuadas (overol, ropas especiales contra radiación, guantes, polainas, etc.) se deben suministrar, principalmente en las operaciones de chorreo de granalla y

termorociado por plasma con arco no transferido, donde la gran cantidad de partículas abrasivas y alta radiación, respectivamente, están presentes. Se debe de contar con buenos equipos de extracción del polvo y del humo, ya que todos los procesos de termorociado lo producen. Por lo tanto, la extracción o la ventilación adecuada para quitar este polvo y humo del entorno de trabajo particular deben ser proporcionadas. Además, si se expone al operador a este ambiente, debe ser considerado un equipo de respiración conveniente. Siempre que sea posible se trabajará en zonas o recintos especialmente preparados para ello y dotados de sistemas de ventilación general y extracción localizada suficientes para eliminar el riesgo de inhalación de humos.

En las aplicaciones de termorociado en espacios cerrados es necesario un respirador de línea de aire, las líneas de aire de suministro deben suministrar al operario aire limpio y seco además de tener un filtro adecuado para quitar los olores, aceites o humedad, y las partículas de la oxidación del aire generado en el compresor. El filtro de aire de la línea del suministro no proporcionará la protección contra contaminantes gaseosos tal como monóxido de carbón a menos que un purificador de aire separado se utilice. Cuando la aplicación del termorociado se realiza en campo abierto, la protección respiratoria adicional puede no ser necesaria, en casos extremos, tal como para el trabajo ligero de duración corta, con materias no tóxicas, pero con la exposición de polvo, se pueden utilizar mascarillas aprobadas de filtro para la protección contra vapores de polvo y metal, estas mascarillas traen filtros de almohadillas (y válvulas intercambiables) que se cambian cuando estén sucias o saturadas.

El personal que trabaje alrededor de la operación de termorociado se le debe de proporcionar una buena protección auditiva, el rango de variación va de 80 decibeles para algunos procesos de llama oxcombustible, hasta 150 decibeles para los procesos hipersónicos y por plasma.

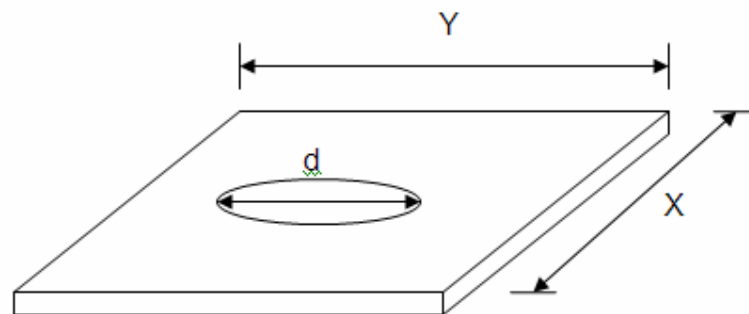
6. COSTOS PARA UN PROCESO DE TERMOROCIADO EN FRÍO

6.1 Cálculo de área a recubrir

Para calcular el área a recubrir nos podemos encontrar tres tipos de piezas: planas, cilíndricas y una mezcla entre estas.

- Para el cálculo de piezas planas, se debe incluir solamente el área a recubrir, para entender mejor se presenta el siguiente ejemplo.

Figura 39. **Pieza plana para cálculo de área a recubrir**



Fuente: **Diseño de aplicación**

Siendo X el ancho de la lámina plana y Y el largo, se obtiene el área total de:

Área cuadrado = XY .

El área del círculo el cual no se necesita metalizar es:

Área de círculo = $\pi(d/2)^2$.

El área total a recubrir es = $(XY - (\pi(d/2)^2))$.

El dato del área a recubrir se debe proporcionar en términos del área a recubrir por cada 0.001 pulgadas de espesor que se quiera recuperar. Es decir.

Donde:

e = espesor que queremos recuperar en pulgadas

e = 0.03 pulgadas

Se obtiene:

Espesor total = (espesor a recuperar) + (espesor para acabado)

Generalmente se utiliza 0.020 pulgadas para el acabado en torno.

Espesor total = 0.03 pulg + 0.020 pulg.

Espesor total = 0.050.

0.050 pulg / 0.001 pulg.

50.

Área que se quiere recubrir = $((XY - (\pi(d/2)^2)))(50)$ pies² x 0.001 pulg.

Suponiendo.

X = 15 centímetros.

Y = 35 centímetros.

d = 8.5 centímetros.

e = 0.030 pulgadas.

e₂ = 0.020 pulgadas para acabado en torno.

Área cuadrado = (15 cm)(35 cm).

Área cuadrado = 525 cm².

Haciendo la conversión a pies cuadrados se tiene:

$$(525 \text{ cm}^2) \times (1 \text{ pulg} / 2.54 \text{ cm})^2 \times (1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg})^2.$$

$$\text{Área cuadrado} = 0.56 \text{ pie}^2.$$

El área del círculo el cual no se necesita metalizar es:

$$\text{Área de círculo} = \pi(8.5/2)^2.$$

$$\text{Área de círculo} = 56.74 \text{ cm}^2.$$

Haciendo la conversión a pies cuadrados se obtiene:

$$(56.74 \text{ cm}^2) \times (1 \text{ pulg} / 2.54 \text{ cm})^2 \times (1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg})^2.$$

$$\text{Área cuadrado} = 0.06 \text{ pie}^2.$$

El área total a recubrir es = (Área cuadrado) – (Área círculo).

$$\text{Área total a recubrir es} = (0.56 \text{ pie}^2 - 0.06 \text{ pie}^2).$$

$$\text{Área total a recubrir es} = 0.50 \text{ pies}^2.$$

$$(e + e_2) / (0.001 \text{ pulg}).$$

$$(0.030 \text{ pulg} + 0.020 \text{ pulg}) / 0.001 \text{ pulg}.$$

$$(0.050 \text{ pulg}) / (0.001 \text{ pulg}).$$

$$50.$$

$$\text{Área a recubrir} = (\text{área}) ((e + e_2) / (0.001 \text{ pulg})) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = (0.50 \text{ pies}^2) (50) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = 25 \text{ pies}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

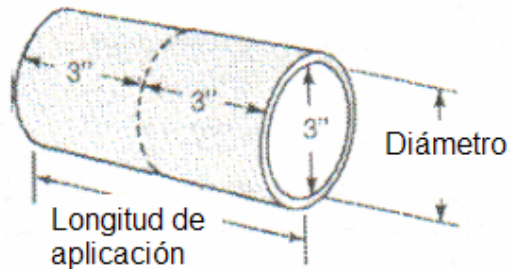
Siempre es aconsejable utilizar un factor de seguridad, por lo tanto.

$$\text{Área a recubrir} = (25 \text{ pies}^2 \times 0.001 \text{ pulg}) (1.15).$$

$$\text{Área a recubrir} = 28.75 \text{ pies}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

Para el cálculo de cilindros, observar la formulación.

Figura 40. **Dimensiones de un cilindro a recubrir**



Fuente: **Diseño de aplicación**

Tomando de referencia la figura anterior se obtiene.

Área cilíndrica = (perímetro)(longitud).

Perímetro = $(2)(\pi)(r)$.

Área cilíndrica = $(2)(\pi)(r)(L)$.

Para el caso de la figura presentada se tiene.

Área cilíndrica = $(2)(\pi)(1.5 \text{ pulg})(6 \text{ pulg})$.

Área cilíndrica = 56.55 pulg^2 .

Haciendo la conversión a pies cuadrados tenemos:

$(56.55 \text{ pulg}^2) \times (1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg})^2$.

Área cuadrado = 0.39 pie^2 .

$(e + e_2) / (0.001 \text{ pulg})$.

$(0.030 \text{ pulg} + 0.020 \text{ pulg}) / 0.001 \text{ pulg}$.

$(0.050 \text{ pulg}) / (0.001 \text{ pulg})$.

50.

$$\text{Área a recubrir} = (\text{área}) ((e + e_2) / (0.001 \text{ pulg})) \times 0.001 \text{ pulg.}$$

$$\text{Área a recubrir} = (0.39 \text{ pie}^2) (50) \times 0.001 \text{ pulg.}$$

$$\text{Área a recubrir} = 19.5 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg.}$$

Siempre es aconsejable utilizar un factor de seguridad, por lo tanto.

$$\text{Área a recubrir} = (19.5 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}) (1.15).$$

$$\text{Área a recubrir} = 22.43 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg.}$$

6.2 Cálculo de aleación requerida

Ya sabiendo el área a recubrir en pies cuadrados por cada 0.001 pulgadas, se hace uso de las tablas de cada aleación, la cual el fabricante de cada producto esta en la obligación de incluirla junto con las aleaciones, en la cual se puede encontrar los datos de: consumo de aleación, velocidad de cobertura de la aleación, la eficiencia del deposito, el consumo de gases, así como el consumo de aleación.

Tabla VII. **Características de aleaciones en polvo marca *Eutectic Castolin***

TERODYN SYSTEM 2000 SERIES 2000
Consumption Data for MetaCeram Proxon 12XXX Alloys

MetaCeram Proxon Alloy	Approx. Alloy Consumption (Note 1)	Approx. Coating Coverage Speed (Note 2)	Deposit Efficiency %	Gas Consumption SCFH		Alloy Consumption lbs/hr
				Oxy	Acet	
21021 Bond	0.040	125.000	90.000	77.000	60.000	5.000
21021 Built up	0.040	260.000	90.000	77.000	60.000	9.000
21022 Bond	0.030	130.000	90.000	77.000	60.000	5.000
21022 Built up	0.039	255.000	90.000	77.000	60.000	10.000
21023 Bond	0.041	120.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21023 Built up	0.041	240.000	85.000	77.000	60.000	10.000
21031 Bond	0.039	120.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21031 Built up	0.039	220.000	85.000	77.000	60.000	8.500
21032S	0.042	215.000	85.000	77.000	60.000	9.000
21041 Bond	0.040	125.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21041 Built up	0.040	210.000	85.000	77.000	60.000	8.500
21071 Bond	0.039	130.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21071 Built up	0.030	360.000	85.000	77.000	60.000	14.000

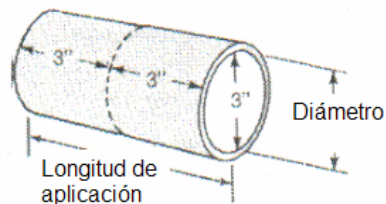
NOTE:

1. Alloy Consumption figure represents the amount (lbs) of alloy required to produce one square feet of coating .001" thick
2. Coating Coverage Speed indicates the square feet of coating .001" thick can be deposited in one hour

Fuente: **Manual equipo Terodyn 2000. Eutectic Corporation, Pág. 12**

Tomando la primera aleación que aparece en la anterior tabla y el último ejemplo de los cálculos de cobertura se obtiene los siguientes datos.

Figura 41. **Dimensiones de un cilindro a recubrir**



Fuente: **Diseño de aplicación**

Tomando de referencia la figura anterior se obtiene.

$$\text{Área cilíndrica} = (\text{perímetro})(\text{longitud}).$$

$$\text{Perímetro} = (2)(\pi)(r).$$

$$\text{Área cilíndrica} = (2)(\pi)(r)(L).$$

Para el caso de la figura presentada se tienen los siguientes datos.

$$\text{Área cilíndrica} = (2)(\pi)(1.5 \text{ pulg})(6 \text{ pulg}).$$

$$\text{Área cilíndrica} = 56.55 \text{ pulg}^2.$$

Haciendo la conversión a pies cuadrados obtenemos:

$$(56.55 \text{ pulg}^2) \times (1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg})^2.$$

$$\text{Área cuadrado} = 0.39 \text{ pie}^2.$$

$$(e + e_2) / (0.001 \text{ pulg}).$$

$$(0.030 \text{ pulg} + 0.020 \text{ pulg}) / 0.001 \text{ pulg}.$$

$$(0.050 \text{ pulg}) / (0.001 \text{ pulg}).$$

50.

$$\text{Área a recubrir} = (\text{área}) ((e + e_2) / (0.001 \text{ pulg})) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = (0.39 \text{ pie}^2) (50) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = 19.5 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

Siempre es aconsejable utilizar un factor de seguridad, por lo tanto.

$$\text{Área a recubrir} = (19.5 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}) (1.15).$$

$$\text{Área a recubrir} = 22.43 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

Tomando el dato de la tabla de la primer fila y segunda columna, se obtienen el dato de 0.040 libras de consumo de aleación por cada pie cuadrado revestido para un espesor de 0.001 pulgadas, por lo tanto.

Consumo aleación = (Área a recubrir) (Consumo de aleación).

Consumo de aleación:

$(22.43 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg})(0.040 \text{ libras/pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg})$.

Consumo de aleación = 0.89 libras.

Libras necesarias de aleación en polvo = 0.89.

6.3 Tiempo requerido

Para el cálculo del tiempo requerido para la aplicación de la aleación (el tiempo de acabado no esta incluido), se hace uso nuevamente de la tabla presentada en donde se obtiene la velocidad de cobertura de la aleación, haciendo siempre referencia a la aleación que aparece en la primera fila se obtiene.

De la tabla se obtienen los siguientes datos:

Velocidad de cobertura de la aleación:

$125 \text{ pies}^2 \times 0.001 \text{ pulg}$.

Y conociendo el área que se debe recubrir del paso anterior.

Tiempo requerido = (Área a recubrir) / (Velocidad de cobertura).

$22.43 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg} / (125 \text{ pies}^2 \times 0.001 \text{ pulg})$.

Tiempo requerido = 0.18 horas.

6.4 Consumo de gas

De la tabla de las características de las aleaciones también se puede encontrar el consumo de gas en pies cúbicos por hora, y con el dato obtenido anteriormente del tiempo de aplicación se puede determinar el consumo de gases tanto oxígeno como acetileno en términos de pies cúbicos.

Tomando de la tabla el consumo de 77 y 60 pies cúbicos por hora, para el oxígeno y acetileno respectivamente, obtenemos.

Para el acetileno.

Consumo acetileno = (tiempo requerido)(consumo de gas).

Consumo acetileno = (0.18 horas)(60 pies cúbicos/hora).

Consumo de acetileno = 10.8 pies cúbicos.

Para el oxígeno.

Consumo oxígeno = (tiempo requerido)(consumo de gas).

Consumo oxígeno = (0.18 horas)(77 pies cúbicos/hora).

Consumo de oxígeno = 13.86 pies cúbicos.

6.5 Cálculo de gastos por el depósito de la aleación

Los costos dependen básicamente del lugar en donde se realice la reparación, dependiendo de la ubicación geográfica así también varían los precios tanto de los materiales como de la mano de obra. Para este caso se utilizarán datos promedios para la aleación, mano de obra y materiales.

Las variables que se deben de manejar para poder calcular el gasto del depósito de la aleación son:

- Precio por libra de la aleación.
- Precio de mano de obra por hora.
- Precio de acetileno por pie cúbico.
- Precio de Oxígeno por pie cúbico.

0.89 libras (consumo) x Q 350.00 (costo libra) Q 311.50

0.18 horas (tiempo) x Q 30.00 (hora de mano de obra) Q 5.40

10.8 pies cúbicos (acetileno) x Q 3.00 (precio pie cúbico)	.....	Q 32.40
13.86 pies cúbicos (oxígeno) x Q 1.00 (precio pie cúbico)	.....	Q 13.86
Costo del depósito	.....	Q 363.16

6.6 Costo total del trabajo

Al igual que el costo de depósito de la aleación, el costo total del trabajo depende del lugar en donde se realice, así también puede variar el costo del mismo, las variables que se deben de tomar en cuenta son:

- Costo del depósito (calculado anteriormente).
- Costo de preparación.
- Costo del acabado (generalmente en torno).

Costo de depósito	.....	Q 363.16
Costo de preparación	.....	Q 160.00
Costo de acabado	.....	Q 200.00
COSTO TOTAL	.....	Q 723.16

6.7 Ejercicio práctico para aplicación de costos de un proceso de termorociado en frío

Encontrar el costo de aplicación para revestir un eje tipo AISI 1045 de diámetro de 10 pulgadas. Al área desgastada por un rodamiento instalado en este eje, es de 8 pulgadas, desgaste de 0.090 pulgadas. Al eje se desea dar un acabado en torno.

Paso 1: calcular área a recubrir.

Área cilíndrica = (perímetro)(longitud).

Perímetro = $(2)(\pi)(r)$.

Área cilíndrica = $(2)(\pi)(r)(L)$.

$$\text{Área cilíndrica} = (2) (\pi) (5 \text{ pulg})(8 \text{ pulg}).$$

$$\text{Área cilíndrica} = 251.33 \text{ pulg}^2.$$

Haciendo la conversión a pies cuadrados se obtiene:

$$(251.33 \text{ pulg}^2) \times (1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg})^2.$$

$$\text{Área cuadrado} = 1.74 \text{ pie}^2.$$

$$(e + e_2) / (0.001 \text{ pulg}).$$

$$(0.090 \text{ pulg} + 0.020 \text{ pulg}) / 0.001 \text{ pulg}.$$

$$(0.11 \text{ pulg}) / (0.001 \text{ pulg}).$$

$$110.$$

$$\text{Área a recubrir} = (\text{área}) ((e + e_2) / (0.001 \text{ pulg})) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = (1.74 \text{ pie}^2) (110) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = 191.40 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

Siempre es aconsejable utilizar un factor de seguridad, por lo tanto.

$$\text{Área a recubrir} = (191.40 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}) (1.15).$$

$$\text{Área a recubrir} = 220.11 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

Paso 2: calcular la cantidad de aleación requerida.

$$\text{Área cilíndrica} = (\text{perímetro})(\text{longitud}).$$

$$\text{Perímetro} = (2)(\pi)(r).$$

$$\text{Área cilíndrica} = (2)(\pi)(r)(L).$$

$$\text{Área cilíndrica} = (2) (\pi) (5 \text{ pulg})(8 \text{ pulg}).$$

$$\text{Área cilíndrica} = 251.33 \text{ pulg}^2.$$

Haciendo la conversión a pies cuadrados se obtiene:

$$(251.33 \text{ pulg}^2) \times (1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg})^2.$$

$$\text{Área cuadrado} = 1.74 \text{ pie}^2.$$

$$(e + e_2) / (0.001 \text{ pulg}).$$

$$(0.090 \text{ pulg} + 0.020 \text{ pulg}) / 0.001 \text{ pulg}.$$

$$(0.11 \text{ pulg}) / (0.001 \text{ pulg}).$$

110.

$$\text{Área a recubrir} = (\text{área}) ((e + e_2) / (0.001 \text{ pulg})) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = (1.74 \text{ pie}^2) (110) \times 0.001 \text{ pulg}.$$

$$\text{Área a recubrir} = 191.40 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

Siempre es aconsejable utilizar un factor de seguridad, por lo tanto.

$$\text{Área a recubrir} = (191.40 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}) (1.15).$$

$$\text{Área a recubrir} = 220.11 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}.$$

El dato de la tabla anterior para el producto tipo 21021, da la referencia de 0.040 libras de consumo de aleación por cada pie cuadrado revestido para un espesor de 0.001 pulgadas, por lo tanto.

$$\text{Consumo aleación} = (\text{Área a recubrir}) (\text{Consumo de aleación}).$$

Consumo de aleación :

$$(220.11 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg})(0.040 \text{ lbs/pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}).$$

$$\text{Consumo de aleación} = 8.8044 \text{ libras}.$$

$$\text{Libras necesarias de aleación en polvo} = 8.8044.$$

Paso 3: calcular el tiempo requerido.

De la tabla anterior también se encuentra el dato que la aleación que se esta utilizando tiene una velocidad de recubrimiento de 125 pies² x 0.001 pulgadas.

Tiempo requerido = (Área a recubrir) / (velocidad de recubrimiento).

Tiempo requerido:

$(220.11 \text{ pie}^2 \times 0.001 \text{ pulg}) / (125 \text{ pies}^2 \times 0.001 \text{ pulg}).$

Tiempo requerido= 1.76 horas.

Paso 4: calcular el consumo de gas.

Tomando datos de la tabla se obtiene que el consumo es de 77 y 60 pies cúbicos por hora, para el oxígeno y acetileno respectivamente.

Para el acetileno.

Consumo acetileno = (tiempo requerido)(consumo de gas).

Consumo acetileno = (1.76 horas)(60 pies cúbicos/hora).

Consumo de acetileno = 105.60 pies cúbicos.

Para el oxígeno.

Consumo oxígeno = (tiempo requerido)(consumo de gas).

Consumo oxígeno = (1.76 horas)(77 pies cúbicos/hora).

Consumo de oxígeno = 135.52 pies cúbicos.

Paso 5: calcular costos de el depósito

8.80 libras (consumo) x Q 350.00 (costo libra)	...	Q 3,080.00
1.76 horas (tiempo) x Q 30.00 (hora de mano de obra)	...	Q 52.80
105.6 pies cúbicos (acetileno) Q 3.00 (precio pie cúbico)	...	Q 316.80
135.5 pies cúbicos (oxígeno) Q 1.00 (precio pie cúbico)	...	Q 135.50
Costo del depósito	...	Q 3,585.10

Paso 6: costo total del trabajo.

Costo de depósito	.....	Q3,585.10
Costo de preparación	.....	Q 200.00
Costo de acabado	.....	Q 350.00
COSTO TOTAL	.....	Q4,135.10

Se debe de tener en cuenta que para cada aleación se tienen datos diferentes, por lo cual es muy importante trabajar siempre los datos precisos para poder lograr obtener los datos mas apegados a la realidad.

La reparación de un eje de 10 pulgadas de diámetro el cual esta desgastado en la parte donde tiene instalado un rodamiento, esta parte desgastada es de 8 pulgadas. El eje que se utilizó para hacer este ejercicio tiene una longitud de 24 pulgadas. La reparación por medio de termorociado en frío tiene un costo total de Q 4, 406.48, un ejercicio práctico para determinar y poder escoger entre la reparación con termorociado o el recambio tenemos. El Precio actual del acero AISI 1045 es de Q22.50 por kilogramo, con lo que se logra obtener el precio de la pieza nueva de recambio.

Tenemos:

Diámetro: 10 pulgadas.

Largo: 24 pulgadas.

Densidad de acero AISI 1045: 7.89 kilogramos / cm³.

Calculando el área del cilindro:

$$A = (\pi)(r)^2.$$

$$A = (\pi)(5 \text{ pulg})^2.$$

$$A = 78.54 \text{ pulg}^2.$$

Calculando el volumen:

$$\text{Volumen} = (\text{Área})(\text{Largo}).$$

$$\text{Volumen} = (78.54 \text{ pulg}^2)(24 \text{ pulg}).$$

$$\text{Volumen} = 1884.96 \text{ pulg}^3.$$

$$\text{Volumen} = 30888.96 \text{ cm}^3.$$

Calculando el peso:

$$\text{Peso (kilogramos)} = (\text{Volumen})(\text{Densidad})/(1000).$$

$$\text{Peso} = (30888.96 \text{ cm}^3)(7.89 \text{ kg/cm}^3)/(1000).$$

$$\text{Peso} = 243.71 \text{ kilogramos}.$$

El precio del eje en material nuevo se obtiene por medio de:

$$\text{Precio} = (\text{Q}22.50/\text{kg})(\text{peso en kg}).$$

$$\text{Precio} = (\text{Q}22.50/\text{kg})(243.71 \text{ kg}).$$

$$\text{Precio} = \text{Q } 5,483.56.$$

El precio de la pieza nueva de recambio es de Q 5,483.56, mientras tanto el precio de la reparación es de Q 4,135.10, se obtiene un ahorro del 24.60 por ciento comparado con la pieza de recambio nueva.

Si bien el 24.60 por ciento de ahorro puede no ser significativo, se debe tener en cuenta que actualmente en el mercado existe una cantidad enorme de materiales en polvo para ser aplicados por medio de termorociado en frío, que no solo tienen las características del acero tipo AISI 1045, sino que existen aleaciones que tienen mucha mayor eficiencia en el trabajo, por ejemplo materiales con porcentajes de babbit. Por lo anterior mencionado se debe tomar en cuenta lo siguiente: al 24.60 por ciento de ahorro con la aplicación del termorociado en frío se le debe sumar, la ventaja que tendrá al aumentar la vida útil de la parte que reparemos, el cual en algunos casos ha llegado a ser de más de un 150 por ciento.

Con toda esta información queda en manos del ingeniero encargado de mantenimiento tomar la decisión de comprar una pieza nueva para mantenerla almacenada en la bodega o simplemente tomar una pieza que se cree desecho para acondicionarla y volverla a poner en uso en la planta.

CONCLUSIONES

1. El desgaste de las piezas se produce por diferentes tipos de mecanismos, es necesario su conocimiento para poder detectarlos en los diferentes procesos, y encontrar la forma de cómo reducirlos o erradicarlos por completo, se debe tener en cuenta que nunca se encontrara un mecanismo de desgaste individual, en todo tipo de desgaste siempre van a estar presentes uno o más de éstos. Por lo cual es necesario hacer un estudio del trabajo y los mecanismos de desgaste a los cuales estuvo sometida la pieza que se desea recuperar para poder seleccionar la aleación que más se adecue al trabajo que realiza, y al desgaste que esta sometida.
2. Los recubrimientos que se realizan por termorociado no recuperaron la capacidad de transportar carga mecánica, solamente se reacondicionaron y adecuaron las superficies.
3. El proceso de termorociado en frío recibe este nombre ya que los revestimientos metálicos que se aplicaron a las piezas mantienen un rango de temperaturas que oscila entre 100 y 250 grados centígrados, por lo que las piezas permanecieron relativamente frías.
4. Debido a que la temperatura del substrato, en el proceso de termorociado en frío fue relativamente baja (menos de 250 grados centígrados), el depósito de las partículas se realizó por un

mecanismo de difusión a baja temperatura, lo cual requirió una adecuada limpieza y rugosidad de éste para el éxito de la aplicación.

5. Cualquier desviación o desatención del procedimiento al ejecutar una aplicación de termorociado en frío puede significar el fracaso de ésta.

6. Con el procedimiento de recuperación por medio de termorociado en frío se obtuvo un ahorro del veinte por ciento, comparado con la compra de una pieza nueva de recambio, se debe tener en cuenta que no se recuperó con la misma aleación desgastada, sino que se utilizó una aleación de mucha mayor eficiencia en el trabajo.

RECOMENDACIONES

1. Las piezas recuperadas por termorociado en frío nunca se deberán de someter a carga puntual o impacto, ya que esta aplicación sólo reacondicionará la superficie de la pieza y no recuperara las propiedades mecánicas.
2. Después de realizar la limpieza de las piezas se deberá proceder inmediatamente a la aplicación del termorociado en frío ya que las superficies metálicas limpias, expuestas al aire atmosférico, pueden existir solamente por un período de tiempo muy corto.
3. Cuando se esté recuperando una pieza en donde el desgaste que presenta sea menor a 0.020 mm, se recomienda realizar un desgaste extra (para un total de 0.050 mm como mínimo), esto con el objetivo de evitar un desprendimiento del material aplicado.
4. Cuando la limpieza del substrato se realiza por medio de chorreo de granalla se debe tener muy en cuenta la presión del aire y el ángulo de aplicación, para no provocar incrustaciones de granalla en el substrato, las cuales provocarán un defecto en la aplicación del termorociado en frío.

5. Para los casos de recuperación de piezas las cuales están sometidas a presiones grandes, tal es el caso de los émbolos hidráulicos, se tiene que proceder al sellado de las porosidades del depósito, debido a que por las grandes presiones que se manejan, provocarán que el termorociado en frío falle por presiones ejercidas desde dentro de estos poros por el agua y/o aceite presentes en el ambiente, para ello se utilizarán ceras especiales que obturan las porosidades del depósito.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Annual Book of ASTM Standards.** Edición annual (Volumen 08.04). EE.UU: Editorial American Society for Testing Materials, 2000. 897 pp.
2. Lawence, Doyle y otros. **Materiales y procesos de manufactura para ingenieros.** 3^a ed. México: Prentice-Hall, 1988. 1042 pp.
3. Fitzgerald, Robert. **Mecánica de materiales.** Colombia: Editorial Alfaomega, 1998. 557 pp.
4. Leyensetter, A. **Tecnología de los oficios metalúrgicos.** España: Editorial Reverté, 1987. 552 pp.
5. Streeter, John. **Curso sobre recuperación de partes y piezas.** Chile: PNUD/ONUDI, 1984. 208pp.

APÉNDICE

Figura 42. **Pre calentamiento de la pieza, antes del termorociado**



Figura 43. **Aplicación de termorociado en frío a un eje**



Figura 44. **Eje termorociado en frío**



Figura 45. **Vista final de un termorociado en frío**

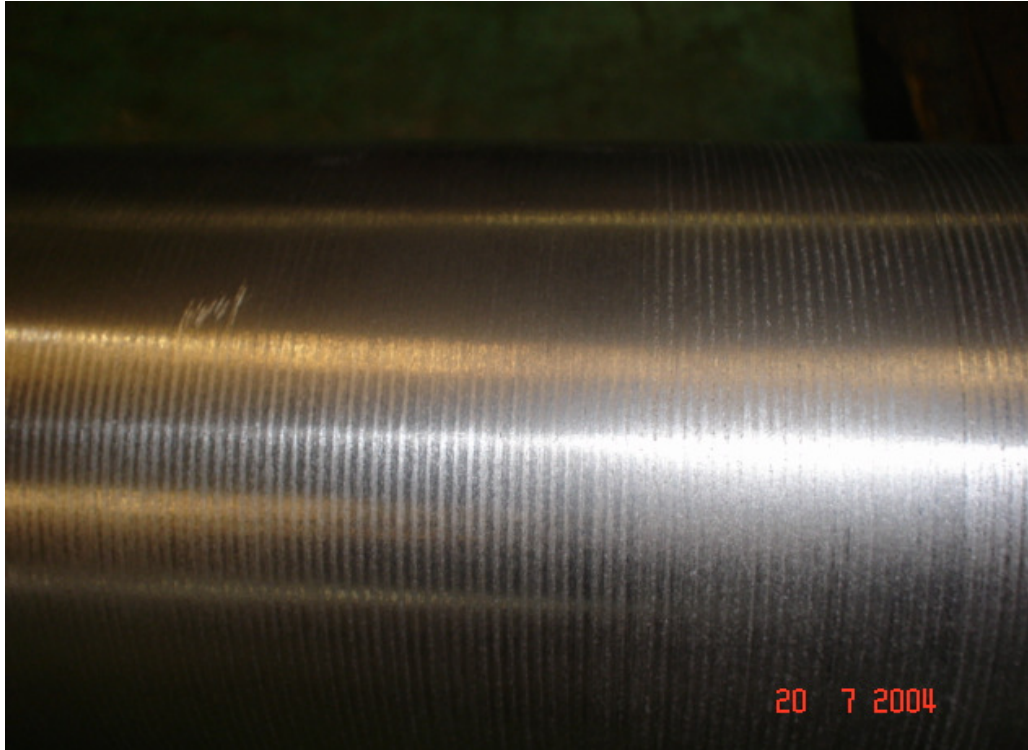


Figura 46. **Termorociado en frío de un ventilador**



Figura 47. **Aplicación de termorociado utilizando aleación de bronce, en un eje tipo AISI 1045**

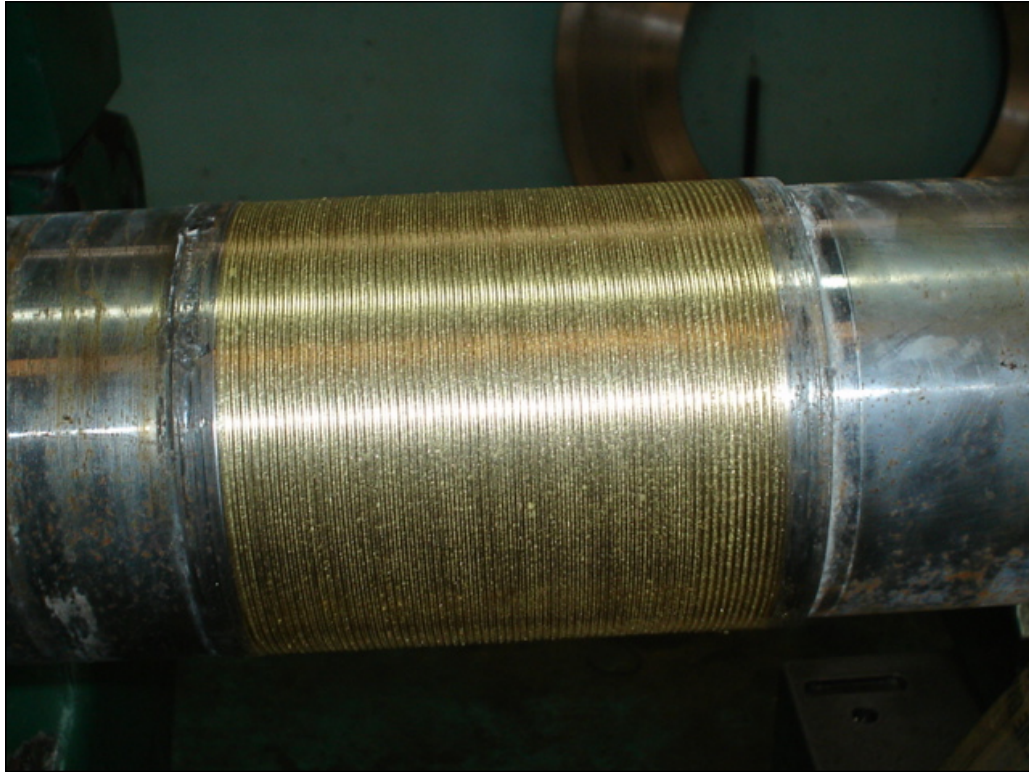


Figura 48. **Fallas comunes en aplicaciones de termorociado en frío**

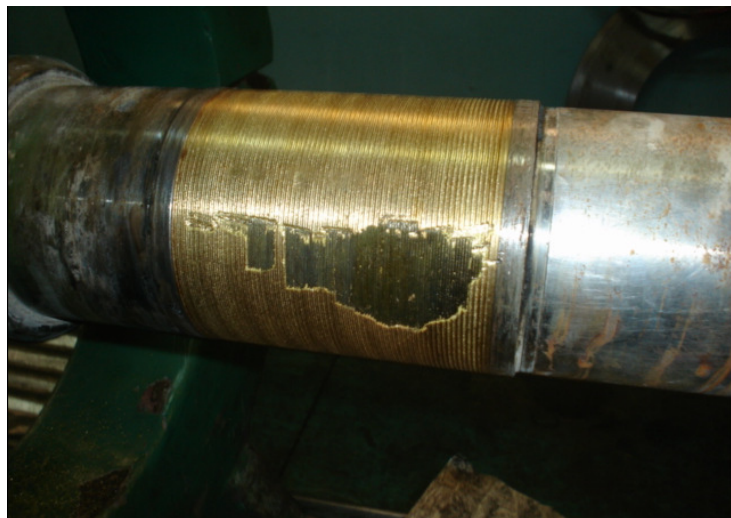


Figura 49. **Medición de temperatura de un termorociado en frío**



Figura 50. **Acabado final de termorociado en frío utilizando aleación de bronce**



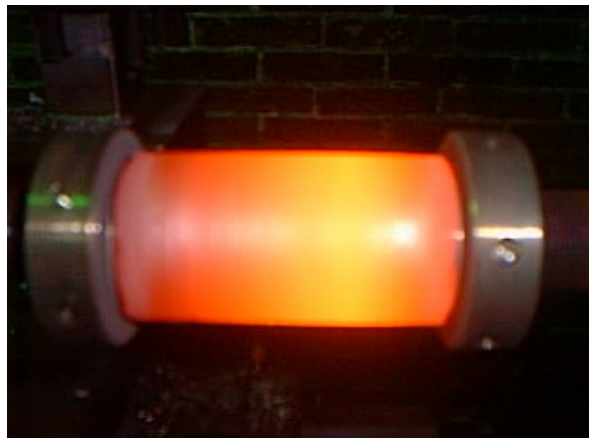
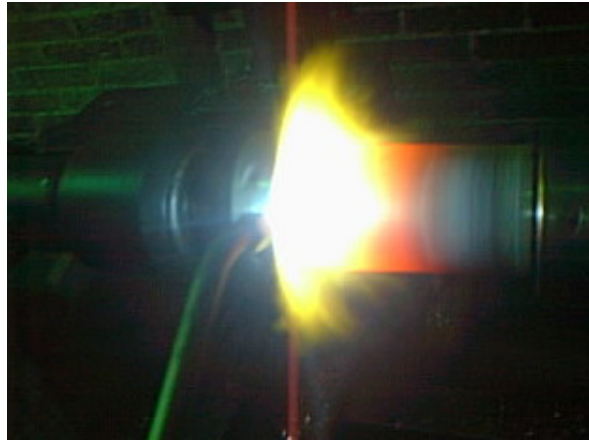
Figura 51. **Limpieza de una pieza a termorociar**



Figura 52. **Termorociado de una pieza plana**



Figura 53. **Termorociado con fusión de aleación (termorociado en caliente).**



ANEXOS

Tabla VIII. **Características y propiedades de los procesos de termoroziado**

	Velocidad de la partícula (m/s)	Adherencia (Mpa)	Contenido de óxido (en metales) %	Porosidad %	Velocidad de depósito (kg/hr)	Espesor típico del depósito (mm)
Llama	40	<8	10-15	10-15	1-10	0.20-10
Arco	100	10-30	10-20	5-10	6-60	0.20-10
Plasma	200-300	20-70	1-3	5-10	1-5	0.2-2
HVOF	600-1000	>70	1-2	1-2	1-5	0.2-2

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 125.**

Tabla IX. **Propiedades de las aleaciones**

Material	Punto de fusión (°C)	Densidad ρ (g/cm ³)	ΔH_m (cal/cm ³)	DMF ($\Delta H_m/\rho-1/2$)
Al ₂ O ₃	2050	4	3900	1450
ZrO ₂	2715	5.6	3470	1446
TiO _x	1870	4.3	2550	1214
Cr ₂ O ₃	2265	5.2	2600	1130
Fe	1536	7.9	2177	780
Mo	2619	10.2	2233	700
W	3427	19.35	2709	616

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 127.**

Tabla X. **Vidrio con filtro recomendado para termorociado**

PROCESO	FILTRO O SCURO
Rociado térmico por combustión (alambre)	2-4
Rociado térmico con Molibdeno en alambre	3-6
Rociado térmico por combustión (polvos)	3-6
Rociado térmico por combustión (cerámicas en polvo)	4-8
Rociado térmico por plasma y arco eléctrico	9-12
Rociado térmico por plasma y arco eléctrico	3-6

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 131.**

Tabla XI. **Características de procesos de termorociado**

					PLASMA
PROCESOS	LVOF	HVOF	ARCO	PLASMA	INDUCTION
Temperatura	A 500°F	A 6000°F	4000-15000°F	4000-15000°F	A 30000°F
Velocidad	200-700	2500-4000	800-1100	800-1800	800-1800
	pies/s (Match 1)	pies/s (Match 1)	pies/s (Match 1)	pies/s (Match 1)	pies/s (Match 2)
Decibeles producidos	110	150	115	132	132
Distancia de aspersion	4-10"	6-18"	2 1/2" - 6"	2 1/2" - 6"	1-8"

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 132.**

Tabla XII. **Nivel de ruido máximo admisible por una persona en su jornada de trabajo**

Decibeles promedio	Horas expuestas por jornada
90	8
92	6
95	4
97	3
100	2
102	1.5
105	1
110	0.5
115	Menos de 0.25

Fuente: **John D. Streeter. Curso sobre recuperación de partes y piezas, Pág. 138.**

Tabla XIII. **Tabla de propiedades de aleaciones para termorociado**

TERODYN SYSTEM 2000 SERIES 2000
Consumption Data for MetaCeram Proxon 21XXX Alloys

MetaCeram Poxon Alloy	Approx. Alloy Consumption (Note 1)	Approx. Coating Coverage (Note 2)	Deposit Speed Efficiency %	Gas Consumption SCFH		Alloy Consumption lbs/hr
				Oxy	Acet	
21021 Bond	0.040	125.000	90.000	77.000	60.000	5.000
21021 Built up	0.040	260.000	90.000	77.000	60.000	9.000
21022 Bond	0.030	130.000	90.000	77.000	60.000	5.000
21022 Built up	0.039	255.000	90.000	77.000	60.000	10.000
21023 Bond	0.041	120.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21023 Built up	0.041	240.000	85.000	77.000	60.000	10.000
21031 Bond	0.039	120.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21031 Built up	0.039	220.000	85.000	77.000	60.000	8.500
21032S	0.042	215.000	85.000	77.000	60.000	9.000
21041 Bond	0.040	125.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21041 Built up	0.040	210.000	85.000	77.000	60.000	8.500
21071 Bond	0.039	130.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21071 Built up	0.030	360.000	85.000	77.000	60.000	14.000

NOTE:

1. Alloy Consumption figure represents the amount (lbs) of alloy required to produce one square feet of coating .001" thick
2. Coating Coverage Speed indicates the square feet of coating .001" thick can be deposited in one hour

Fuente: **Eutectic+Castolin**

Tabla XIV. **Tabla de propiedades de aleaciones para termorociado**

TERODYN SYSTEM 2000 SERIES 2000
Consumption Data for MetaCeram Proxon 21XXX Alloys

HIGH COATING RATES

MetaCeram Proxon Alloy	Approx. Alloy Consumption (Note 1)	Approx. Coating Coverage (Note 2)	Deposit Speed Efficiency %	Gas Consumption SCFH		Alloy Consumption lbs/hr
				Oxy	Acet	
21021	0.040	350.000	95.000	82.000	60.000	14.000
21022 Bond	0.039	130.000	90.000	77.000	60.000	5.000
21022 Built up	0.039	345.000	90.000	82.000	60.000	15.000
21031	0.039	360.000	95.000	82.000	60.000	14.000
21032S	0.042	285.000	90.000	82.000	60.000	12.000
21041 Bond	0.040	125.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21041 Built up	0.040	210.000	85.000	77.000	60.000	8.500
21071 Bond	0.039	180.000	85.000	77.000	60.000	5.000
21071 Built up	0.039	360.000	85.000	77.000	60.000	14.000

NOTE:

1. Alloy Consumption figure represents the amount (lbs) of alloy required to produce one square feet of coating .001" thick
2. Coating Coverage Speed indicates the square feet of coating .001" thick can be deposited in one hour

Fuente: **Eutectic+Castolin**

Tabla XV. **Tabla de propiedades de aleaciones para termorociado**

TERODYN SYSTEM 2000 SERIES 2000
Consumption Data for MetaCeram Proxon 29XXX Alloys

MetaCeram Proxon Alloy	Approx. Alloy Consumption (Note 1)	Approx. Coating Coverage (Note 2)	Deposit Speed Efficiency %	Gas Consumption SCFH		Alloy Consumption lbs/hr
				Oxy	Acet	
29011	0.042	355.000	95.000	77.000	60.000	15.000
29012	0.040	400.000	95.000	77.000	60.000	16.000
5000	0.044	195.000	90.000	77.000	60.000	8.500
29051	0.037	540.000	90.000	64.000	39.000	20.000
29077	0.041	390.000	95.000	77.000	60.000	16.000
29079	0.042	425.000	95.000	64.000	39.000	20.000
29096	0.046	415.000	95.000	77.000	60.000	19.000
29123	0.071	115.000	80.000	77.000	60.000	8.000
29032	0.043	280.000	90.000	64.000	48.000	10.000
29210	0.015	360.000	95.000	60.000	38.000	5.000
CPW 1951	0.015	1150.000	95.000	77.000	60.000	15.000
CPW 1940	0.055	450.000	95.000	60.000	27.000	20.000
29240	0.060	515.000	90.000	60.000	27.000	20.000

NOTE:

1. Alloy Consumption figure represents the amount (lbs) of alloy required to produce one square feet of coating .001" thick
2. Coating Coverage Speed indicates the square feet of coating .001" thick can be deposited in one hour

Fuente: **Eutectic+Castolin**