

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis técnico de la recuperación de piezas. Caso práctico

Autor: María Sánchez Arcos

Tutor: Aida Estévez Urra

Dpto. Ingeniería mecánica y fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis técnico de la recuperación de piezas. Caso práctico

Autor:

María Sánchez Arcos

Tutor:

Aida Estévez Urra

Profesora Colaboradora

Dpto. Ingeniería mecánica y fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Análisis técnico de la recuperación de piezas. Caso práctico

Autor: María Sánchez Arcos

Tutor: Aida Estévez Urra

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Este trabajo de investigación, que parte del interés de conocer en mayor profundidad los distintos métodos empleados en la recuperación de piezas, así como cuando estos deben ser aplicados, parte del estudio de los métodos históricamente empleados, a partir de los cuales se ha podido conocer su evolución temporal, que ha tenido lugar gracias al desarrollo técnico y a las investigaciones llevadas a cabo. Hasta finalmente, llegar al estudio de los métodos más modernos, y cuyo uso está más extendido en la actualidad.

Por otro lado, se ha podido realizar un estudio técnico en un taller de la recuperación real de dos bombas centrífugas verticales multietapas. Para que finalmente, junto con el marco teórico, se haya podido llegar a la discusión y el análisis crítico de los métodos de recuperación estudiados.

Abstract

This research work, which starts from the interest of knowing in greater depth the different methods used in the recovery of pieces, as well as when they must be applied, part of the study of the historically used methods, from which it has been possible to know its temporal evolution, which has taken place thanks to the technical development and research carried out. Until finally, come to the study of the most modern methods, and whose use is more widespread today.

On the other hand, it has been possible to carry out a technical study in a real recovery workshop of two multi – stage vertical centrifugal pumps. So that finally, together with the theoretical framework, the discussion and critical analysis of the recovery methods studied could be reached.

Índice:

1.	Introducción	2
1.1.	Antecedentes	2
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Tareas a desarrollar	4
2.	Métodos de recuperación de piezas	5
2.1.	Introducción	5
2.1.1.	Desgaste	5
2.1.2.	Materiales	9
2.1.3.	Organización de la recuperación	11
2.2.	Recuperación de hierro fundido por soldadura	13
2.3.	Recuperación por proyección térmica	22
2.4.	Recuperación por metalización	31
2.5.	Recuperación de piezas por métodos galvánicos	34
2.6.	Recuperación de piezas por deformación plástica	38
2.7.	Recuperación de piezas por deformación térmica	42
2.8.	Recuperación de piezas mediante resinas y pegamentos	43
2.9.	Aplicación de tratamientos térmicos en la recuperación de piezas	47
2.10.	Recuperación de piezas mediante recubrimientos por termodifusión o termoquímicos	48
2.11.	Recuperación de piezas por fundición	51
2.12.	Recuperación de piezas por encasquillado	53
3.	Caso práctico – Bomba	55
4.	Conclusiones y recomendaciones	63
5.	Bibliografía	64

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes

La mayoría de las instalaciones e infraestructuras de la industria actual poseen largos historiales de funcionamientos. Según Silvia Rodríguez Colina (1993), debido al funcionamiento y exigencias a las que se ven sometidas las piezas durante su vida útil estas sufren un deterioro, que podrá ser mayor o menor según las condiciones de trabajo a las que estén sometidas. Llegando hasta un punto, donde la pieza será definida como inservible físicamente, es decir, ha perdido sus parámetros permisibles de trabajo siendo inutilizable para la continuación de su explotación, o, pudiendo continuar un poco más, no vaya a alcanzar hasta su próximo mantenimiento programado.

Dada esta situación, se plantean dos opciones, por un lado se puede proceder a un cambio de la pieza, o por el otro, se le puede someter a un proceso tecnológico que garantice la devolución de sus parámetros nominales o permisibles.

La toma de esta decisión dependerá de la situación en la que se encuentre la pieza, ya que no ante todas las situaciones será posible llevar a cabo las operaciones de recuperación requeridas, por lo que de este modo se obliga a un cambio directo de la misma. Independientemente de esta decisión, será conveniente realizar en todos los casos un estudio económico para comprobar la viabilidad de ambas opciones. Este estudio junto con el estudio técnico son los determinantes de la decisión. Por otro lado, existen otras cuestiones a favor de llevar a cabo la recuperación, que también se tendrán que tener en consideración para la toma de la decisión. Estas cuestiones son, la obsolescencia de los modelos debido a su antigüedad, los grandes costes de compra o la adaptación del sistema industrial a esa tecnología en concreto.

Según Francisco Martínez Pérez (1993), el motivo principal por el que las piezas pierden sus parámetros permisibles de trabajo, es el deterioro por desgaste. Este se puede producir por la presencia de pares de fricción en la interacción de la pieza en su sistema, o por la presencia de algún agente activo en las superficies de fricción. Aunque hay diversos factores que inciden sobre el mecanismo de contacto y su naturaleza, como pueden ser la combinación de temperaturas elevadas con altas presiones en los puntos de contacto, esto conducirá a cambios significativos en la capa superficial y en sus propiedades. La oxidación, presenta un papel muy importante en este proceso, al igual que la rugosidad y las ondulaciones originales de la superficie. Además, la interacción de los gases y líquidos con las superficies de los sólidos durante el deslizamiento tendrá un efecto significativo en cómo afecta la fricción al desgaste de las piezas que están interaccionando.

Como ya se ha mencionado, la recuperación tiene un papel fundamental en el mantenimiento de cada pieza del puzzle en su sitio. Hasta tal punto, que son muchos los ejemplos que se pueden encontrar de diferentes piezas que han sido sometidas a alguna tecnología de recuperación:

- Tal y como señala Roque Fernando Barron Guardia (2003), se ha llevado a cabo la recuperación del lampón de un tractor CAT D6R mediante soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos.

El lampón está constituido por una plancha de acero anclado sobre la base del mismo, siendo esta plancha junto a las cuchillas y catoneras de lampón, los elementos que sufren mayor desgaste. Considerando el tamaño y peso de esta pieza perteneciente a una maquinaria pesada, queda justificada la necesidad de su recuperación y no la de su sustitución.

- También se ha realizado una recuperación de las tapas de los cilindros del motor de las locomotoras TGM8K mediante soldadura manual por arco eléctrico (Pablo Oñoz Gutiérrez, 2017).
- Helber Giovanni Chambi Paucar (2014), logró recuperar el pestillo de la compuerta del cucharón de una pala mecánica 3800 – 4100 (figura 1.1) mediante soldadura por arco eléctrico SMAW. De esta forma evitó la espera de largos periodos para conseguir un recambio del mismo, logrando así salvar las enormes pérdidas económicas para la industria minera. El fallo se originó debido a que las huellas profundas del maquinado se vieron aceleradas, como consecuencia de las microfisuras resultantes del proceso de soldadura.



Figura 1.1. Pestillo de la compuerta del cucharón de la pala mecánica (Fuente: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2645/IMchpahg.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

- Esney Concepción Concepción (2016) realizó la recuperación de las camisas del motor YUCHAI mediante el mecanizado de las mismas.
- Por último, Rafael Antonio Goytisolo Espinosa (2009) llevó a cabo la recuperación del cuerpo del distribuidor hidráulico de la alzadora BMH – II mediante el encasquillado con un tubo de acero en la zona del orificio donde se había producido la fractura.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo consisten en conocer en mayor profundidad algunos de los métodos de recuperación de piezas más empleados. Para ello, se ha realizado un estudio de dichos métodos, tomando como base los más utilizados hace unas décadas, y de este modo, poder conocer cómo se han ido desarrollando a lo largo de los años gracias a los avances técnicos y científicos. Además, de llegar a conocer los nuevos métodos y tecnologías que están surgiendo, y cuyo uso se está popularizando en decremento de los más tradicionales.

Pero no solo conocerlos de forma teórica, sino también conocer su utilidad práctica, destacando su gran uso. Pues la recuperación de piezas, principalmente de grandes dimensiones, es una de las actividades más habituales y extendidas en los trabajos de mantenimiento de las industrias. Para ello, se expondrán ejemplos de recuperaciones que han sido llevadas a cabo mediante diferentes métodos y en piezas aún más diferentes entre sí, aunque en el apartado anterior ya se ha hecho mención de algunos ejemplos, con el fin de destacar su importancia y utilización.

Finalmente, se desarrollará en mayor profundidad un ejemplo de recuperación estudiado de primera mano, donde se buscará la cuestión y el debate basados en la posibilidad de haber llevado a cabo su recuperación mediante otros métodos existentes en lugar de los escogidos.

1.3. Tareas a desarrollar

Aunque posea una parte práctica, este trabajo se trata principalmente de la realización de una investigación. Para ello, se ha hecho uso no solo de libros y manuales, sino también de artículos de revistas, pequeñas publicaciones, artículos en webs, trabajos de investigación y universitarios. Con ello, no solo se ha buscado exponer información, sino que también se ha realizado un análisis crítico de la misma con la ayuda del caso práctico.

A su vez, la parte práctica del trabajo ha permitido conocer de primera mano cómo se trabaja en el mundo de la recuperación, gracias a la visita a un taller de recuperación. Esto ha permitido la exposición de este caso práctico en mayor profundidad, además de servir como guía para el cuestionamiento crítico de la elección de un método frente a otro para llevar a cabo la recuperación.

Capítulo 2: Métodos de recuperación de piezas

2.1. Introducción

Al abordar los diferentes métodos y tecnologías de recuperación de piezas, hay aspectos muy importantes a tener en cuenta como son el desgaste como causa fundamental de la necesidad de recuperar una pieza, los materiales como elemento determinante en la selección del método más adecuado y la forma en que se ejecute el método. Todos estos se tratarán en este capítulo, así como los métodos de recuperación fundamentales.

2.1.1. Desgaste

Según Francisco Martínez Pérez (1993), el estudio del problema del desgaste comienza con la búsqueda de una relación entre la fricción, el desgaste y las características fisicomecánicas de los cuerpos en deslizamiento, además de la dependencia de estas con las condiciones exteriores, consideradas como constantes. La fricción y el desgaste son analizados en tres etapas consecutivas:

1. Interacción de las superficies.

El principal proceso que tiene lugar en las superficies de fricción es la formación de los puntos de contacto, este es el resultado de aplicar los procesos de penetración mutua de las asperezas y la posterior formación de "puentes soldados". Ambos procesos ocurren a presiones locales muy elevadas, aunque la carga total en el par de deslizamiento sea baja, esto sucede porque el área total de los puntos de contacto es muy pequeña. El incremento del área de contacto real se produce gracias al incremento del número de puntos de contacto y no al aumento de su tamaño, pudiéndose producir la interacción molecular o adhesión, esta consiste en la interacción entre la superficie del sólido con los átomos y las moléculas del medio ambiente, independientemente de su estado de agregación. Debido a que dichas superficies no están en equilibrio, estas presentan una elevada energía superficial, por lo que en los puntos de contacto real entre dos superficies unidas se producirá la liberación de una proporción significativa de energía superficial.

La adhesión depende de las fuerzas de interacción entre los átomos y moléculas de los sólidos en contacto, generalmente de Van der Waals. Por lo que se alcanzan valores tan elevados que implican la transferencia de material entre superficies. Por lo tanto, la dureza superficial es determinante en la formación de estos enlaces, ya que cuanto más blanda sea la superficie, mayor será la deformación, por lo que mayor será la probabilidad de daño y mayor la probabilidad de endurecimiento por deformación y, por lo tanto, de que se produzca el daño a mayor profundidad.

La penetración de las asperezas individuales se debe a las altas presiones presentes en los puntos de contacto individuales, como consecuencia de las diferencias entre las durezas y los módulos de elasticidad de los cuerpos en contacto, así como de las diferentes configuraciones de las asperezas. Esto permite distinguir entre interacción elástica, plástica y microcorte.

En el caso de que las asperezas se deslicen bajo condiciones de deformación plástica, se producirá una redistribución de la presión, que provocará una penetración posterior de la aspereza. En este caso, pasará de ser un deslizamiento plástico a ser un microcorte.

2. Cambio en las propiedades de las superficies.

En los puntos de contacto de las asperezas, aparecen elevadas presiones específicas, pudiendo llegar estas a valores de $1/5$ ó $1/10$ del esfuerzo teórico del material. Ante un incremento de la carga, las

presiones reales presentes en las asperezas de contacto no aumentan significativamente, sino que producen un gradiente de presiones entre el cuerpo duro y el rugoso, cargando a las asperezas individuales en interacción.

El trabajo de las fuerzas de fricción es transformado en calor, que calienta la capa superficial hasta llegar, incluso, al punto de fusión, incluso en cuerpos con bajo punto de fusión. Consecuentemente, aparece una distribución de temperaturas y un alto gradiente térmico.

Se puede hablar de diferentes variaciones en la capa superficial, como variación en la configuración geométrica de la superficie, en la estructura de la capa y en la capa o película más externa. Aunque las propiedades de la zona superficial, vienen determinadas por las tensiones residuales en la capa, el fortalecimiento o endurecimiento del material, los cambios estructurales del material, las dimensiones de los cristales, la textura de zonas en planos por debajo de la superficie y los defectos de los materiales.

3. Daño de la superficie.

La destrucción de la superficie se produce como consecuencia del proceso de desgaste, por la separación de partículas del material, afectando así a secciones superficiales desde unas pocas fracciones de micrómetros hasta una gran cantidad de milímetros.

En algunos casos particulares, dicha destrucción se manifiesta debido a la evaporación del sólido por disociación. Esto da lugar a una acumulación constante de daños irreversibles, por ejemplo, la aparición de heterogeneidad en la estructura y el aumento de los esfuerzos entre otros. En algunos casos puede causar la aparición de grietas, que originarían posteriormente la aparición de partículas de desgaste. En ocasiones, la destrucción va a estar precedida de un cambio de las propiedades del sólido.

El gran número de posibles clasificaciones de los diferentes tipos de desgaste se debe a la naturaleza de este tipo de destrucción superficial, ya que es extremadamente variable, al igual, que su mecanismo. Una de las clasificaciones más completas, es la dada en 1962 por Kragelski basada en la naturaleza de la interacción entre las superficies y el daño producido en estas, pudiéndose distinguir cinco tipos de enlaces de fricción (figura 2.1.):

- En el Enlace Elástico de Fricción se produce un desplazamiento elástico del material, debido a que la carga actuante y la adhesión no provocan la aparición de un esfuerzo superior al límite plástico del material en la zona de contacto. En este caso sólo se puede producir desgaste debido a la fatiga por la fricción.
- En el Enlace Plástico de Fricción, el esfuerzo es superior al límite elástico del material en la zona de contacto, por lo que fluye en la zona de alrededor de la aspereza. El desgaste es el resultado de un bajo ciclo de fatiga de fricción.
- En el Enlace de Microcorte de Fricción, los esfuerzos cortantes alcanzan valores lo suficientemente elevados y en tiempos muy breves, por lo que dan lugar a una velocidad de deformación elevada. El daño es simultáneo a la interacción.
- En el Enlace de Adhesión de Fricción, debido a la alteración del enlace de fricción, se produce un daño directo, que contribuye a la aparición de esfuerzos de contacto y deformaciones. También está acompañado de procesos de fatiga.
- En el Enlace de Ruptura Cohesional de Fricción el enlace de fricción es más fuerte que el material subyacente, por lo que aparece un desgarramiento del mismo a cierta profundidad. El daño es simultáneo a la interacción, variando el relieve superficial y desprendiéndose partículas irregulares.

Bajo condiciones de contacto elástico son hechos insignificantes, pero en condiciones de contacto plástico pueden apreciarse severas indentaciones.

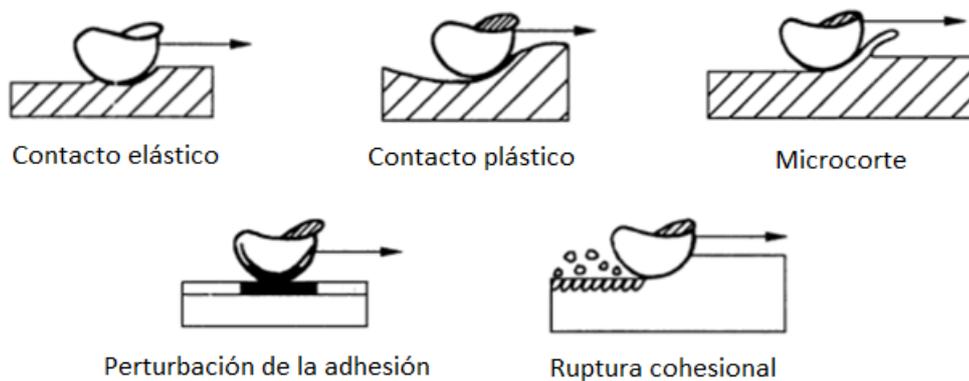


Figura 2.1. Tipos de perturbaciones en los enlaces de fricción.

(Fuente:https://books.google.es/books?id=ht0KP_IscosC&pg=PA28&lpg=PA28&dq=formacion+de+puentes+soldados+entre+puentos+de+contacto&source=bl&ots=UnzVIJk33&sig=ACfU3U3WO_2TzHx2AWMUWJ3cBgGQ3xlow&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj4ofPhy8LhAhXnUxUIHZ25DawQ6AEwBHoECACQAQ#v=onepage&q&f=false)

Por lo tanto, el desgaste está asociado de forma determinante a una serie de factores relacionados con las características tecnológicas del material de fabricación, como lo son el estado de la materia prima, la presencia de líneas de forja o textura en el material, la distribución y orientación de los carburos, la segregación del material, las tensiones residuales, etc.

Así como la calidad de la superficie de contacto durante la fricción por deslizamiento, independientemente de la rugosidad superficial inicial en cada superficie de los pares de deslizamiento se va a alcanzar una determinada rugosidad que permanecerá estable durante un régimen de fricción determinado. Por lo que independientemente del tipo de fricción, durante el proceso de asentamiento, la rugosidad superficial se transformará en una nueva de explotación, donde trabajará de forma estable.

En el caso de que sea posible elaborar una superficie de desgaste con la rugosidad de “explotación” deseada es innecesario el periodo de asentamiento, pudiendo acortar la etapa de desgaste más intenso en dicha superficie. En primer lugar, es necesaria la caracterización del proceso de desgaste y la cinemática del movimiento. También es importante, tener en cuenta que la rugosidad superficial inicial va a limitar en la intensidad del desgaste el periodo de asentamiento. Por lo que, una mayor velocidad de desgaste en el periodo de asentamiento va a implicar un mayor desgaste.

Es importante la determinación adecuada de los parámetros de rugosidad superficial óptimos de las superficies de fricción para las condiciones reales de trabajo, siendo posible la disminución de las exigencias de elaboración de las superficies, influyendo económicamente al no ser necesaria la utilización de determinadas operaciones de maquinado.

Además de la importancia de los parámetros de rugosidad superficial en el desgaste, hay que tener en cuenta la dirección de las huellas del maquinado. Pues deben de ser paralelas a las de la dirección del desgaste. No obstante, no puede tratarse de una ley, pues dependerá de las condiciones concretas de trabajo, de la rugosidad superficial inicial, de la presión del régimen de lubricación y de los materiales, entre otros factores.

Otro de los factores más influyentes en la resistencia al desgaste de los materiales metálicos es su componente estructural. Es decir, no sólo las fases presentes, sino su distribución, cantidad relativa y el

carácter de los enlaces entre los diferentes componentes. Muchos investigadores coinciden en que la estructura óptima para resistir determinadas condiciones de desgaste, se determinan mediante una combinación estructural adecuada y una combinación de propiedades fisicomecánicas, físicas y fisicoquímicas.

En la mayoría de los casos es imposible obtener todas estas propiedades simultáneamente, debido a sus incompatibilidades. Por ello es necesario alcanzar a una proporción equilibrada de estas.

La resistencia al desgaste de una aleación se caracteriza por los parámetros esenciales relacionados con su matriz de forma, cuya interacción con las fases precipitadas permite asimilar los cambios producidos en la superficie debidos al proceso de desgaste y ofreciendo un desgaste mínimo. Un aspecto fundamental de este comportamiento es la adecuada coherencia entre la matriz y las fases precipitadas, debido a la resistencia de la primera si la coherencia es alta puede producirse el desprendimiento de las fases precipitadas, acelerando el mecanismo de desgaste. Las fases dispersas deberán ser pequeñas, esféricas y uniformemente distribuidas.

Han sido numerosos los estudios que han investigado diferentes aspectos de los componentes estructurales, estos se han enfocado más en las particularidades de la estructura cristalina y en su composición química, estudiando la relación entre la resistencia al desgaste y la estructura de las aleaciones.

Al igual que otros estudios relacionados con el papel de cada fase en la resistencia al desgaste, siendo uno de los más controvertidos el de la austenita. Sin embargo, hay quienes opinan que su efecto es negativo, aunque son varios los autores que consideran que la sustancia altamente aleada tiene mucha mayor dureza, resistencia y viscosidad al impacto, que la ferrita, lo que la hace mucho más resistente al desgaste, pues la austenita se fortalece en la deformación mucho más que la ferrita, y es a partir de aquella de la que se obtiene la martensita. Por lo tanto, es más favorable el papel de la austenita como fases secundarias precipitadas de alta dureza, para lograr una matriz coherente. Las aleaciones con una matriz austenítica inestable poseen una mayor resistencia al desgaste que aquellas con matrices de fases estables. Algunas investigaciones desarrolladas en aceros tipo X12VI y 20X13, sometidos a tratamientos termoquímicos, demostraron que en presencia de austenita retenida y carburos, la resistencia al desgaste era mucho mayor. Por lo que en las matrices y estampas con estas características, la vida útil logra incrementarse de cuatro a seis veces.

El papel del tipo de carburo presente también tiene un efecto significativo en la resistencia al desgaste, pues en aceros con 12 % de Cr, la presencia de V incrementa esta resistencia gracias a la aparición de carburos tipo MC en vez de los del tipo M_7C_3 .

Finalmente, se llega a la conclusión de que la mayor resistencia al desgaste se obtiene en estructuras de matriz martensítica – austeníticas o austeníticas con carburos específicos de gran dureza y de pequeño tamaño, uniformemente distribuidos.

Por otro lado, en materiales con estructura de solución sólida, su resistencia al desgaste aumenta tras un envejecimiento, pues permite la precipitación fina y uniforme en la matriz. Por supuesto, cada recubrimiento se buscará en función del tipo de desgaste y su mecánica, pues los factores no son sólo de tipo mecánicos, sino también físicos y fisicoquímicos. Existen diversos métodos tecnológicos para mejorar la resistencia al desgaste de las superficies de contacto, siendo algunos de ellos usados para la recuperación de los elementos sometidos a este proceso de desgaste.

La elección del método, tiene un carácter técnico – económico, pero también exige de un análisis organizativo que tenga en cuenta las posibilidades tecnológicas, el suministro de materiales, la cualificación del personal, entre otros aspectos.

A nivel general, los métodos pueden ser:

- Por soldadura: arco manual, arco sumergido, bajo protección de gases, arco abierto, arco oscilante y vibrátil, electroescoria, manual oxiacetilénica.
- Por proyección térmica: a la llama en caliente, a la llama en frío, detonación, plasma.
- Por recubrimientos galvánicos: cromado, acerado, niquelado, cincado, cobreado, metal babbit.
- Por resinas y pegamentos: adhesivos, regeneración de partes perdidas, sellaje, reconstrucción y protección antidesgaste.
- Por deformación plástica: enderezado, recalado, compresión, dilatación, estirado, penetración, moleteado.
- Por tratamientos térmicos y termoquímicos: temple y revenido, cromado difuso, nitrurado, borado, carbocromado.
- Por fundición: centrifugado o metal fundido.
- Por plasma iónico al vacío: nitruro de titanio.

Algunos de estos métodos, junto a otros, serán los estudiados en los siguientes apartados, debido a su común uso para la recuperación directa de piezas que han sufrido un profundo desgaste, hasta el punto de que hayan perdido sus dimensiones permisibles de trabajo. No se estudiarán solo diferentes tecnologías que han sido usadas y se usan actualmente, sino también se estudiarán otras nuevas que se están empezando a usar.

2.1.2. Materiales

Tal y como comenta Osmara Ortiz Núñez (1993) en uno de sus libros, antes de entrar en las tecnologías en sí, es necesario conocer los materiales de aporte, pues son uno de los elementos principales de estos procedimientos.

Para la recuperación de piezas son utilizados diferentes tipos de materiales cerámicos, metálicos, plásticos o combinaciones de éstos, además de nuevos materiales que están adquiriendo un papel cada vez más relevante en estas tecnologías, gracias a las numerosas investigaciones. Un ejemplo de estos nuevos materiales son los compositex, pues los más usados históricamente han sido las aleaciones metálicas.

Hay que considerar, que los materiales empleados en la recuperación son materiales capaces de responder a unos diseños específicos, teniendo como punto de partida su capacidad para contrarrestar los mecanismos encargados del deterioro de las superficies que han llevado a las piezas a esta situación, de no estar aptas para el servicio o funcionamiento.

La selección de la forma de elaboración de estos materiales está condicionada con la tecnología de recuperación elegida. Los formatos de uso más habitual, son: electrodos revestidos, polvos, alambres tubulares y macizos, fundentes, diferentes tipos de sales, perfiles y otros. Sin embargo, en todos los casos, las propiedades de los depósitos obtenidos dependen de sus estructuras, aunque estas son predecibles, gracias a sus correspondientes diagramas de equilibrio. Uno no se puede olvidar de la importante influencia que tienen las condiciones de deposición en las características estructurales, pues

estas actúan sobre la posición de los puntos críticos, y, en la presencia y densidad de los defectos estructurales. Toda esta teoría se encuentra de forma resumida en la tabla 2.1., donde aparecen recogidas las características básicas de los diferentes materiales según el tipo de desgaste. Esta tabla se convierte en una guía muy útil para la selección de los materiales necesarios para las tecnologías de recuperación de piezas, aunque no se debe olvidar la existencia de otras opciones.

Tabla 2.1. Características principales del metal depositado según el tipo de desgaste y Principales métodos de recuperación empleados en la obtención de los recubrimientos.

Tipo de desgaste	Elementos sobre la composición química y los rangos de dureza
Abrasivo	
Métodos de recuperación más empleados: soldaduras, proyección térmica de algunos materiales y aplicación de determinadas resinas. Contraindicados los recubrimientos galvánicos.	Aceros y fundiciones. El contenido de carbono de medio a alto, se incrementa con la intensidad del proceso: $0,4 \leq C \leq 6 \%$. Presencia de elementos formadores de carburos que se incrementan con la carga: $Cr \leq 35 \%$, $W \leq 18 \%$, $Mo \leq 10 \%$, $V \leq 4 \%$. Rango de dureza alta y media, se incrementa en la intensidad del proceso de 45 a 65 HRC.
Fricción metal – metal (adhesivo)	
Métodos de recuperación: soldadura, proyección térmica, galvanizado, resinas, deformación, plástica, fundición y termodifusión.	Aceros de baja y media aleaciones, con bajos y medios contenidos de carbono: $0,1 \leq C \leq 0,4 \%$. Aleantes níquel y elementos formadores de carburos: $Ni + Cr + Mn + Mo + V \leq 10 \%$. Aleantes para material base níquel: B, Si, Cr.
Impactos	
El método más empleado es la soldadura. Contraindicadas la vía galvánica y las resinas.	Acero de bajo C, en aceros de baja aleación: $C \leq 0,25 \%$. Presencia de elementos formadores de carburos. Altos contenidos de C con altos contenidos de Mn: $0,8 \leq C \leq 1,2 \%$ Con $12 \leq Mn \leq 18 \%$. Depósitos de acero Hardfield.
Corrosivo - mecánico	
Métodos empleados con mayor frecuencia: soldadura, proyección y galvánico.	Aceros de contenido de Cr por encima del 13 % y bajos contenidos de C. Utilización de estabilizadores cuando hay peligro de precipitación de carburos de Cr, Nb, Ti. Presencia de Ni.
Térmico	
Métodos comunes: soldadura, termodifusión y fundición.	Aceros. Presencia de alto Cr y Ni. Presencia de Co. Otros aleantes: Mo, W, V, Nb.
Cavitación	
Métodos más empleados: soldadura, proyección, resinas y fundición.	Aceros de contenido de C desde 0,2 a 2 %. Aleantes formadores de carburos y Ni. Bronces fundamentalmente al Al 12 %.
Erosión	
Métodos más utilizados: soldadura y proyección.	Aceros de medio y alto contenido de C: $C > 0,4 \%$. Aleantes formadores: Cr, W, Mo.

Como recordatorio, a la hora de realizar la selección del material de aporte, se deben tener en cuenta tanto aspectos económicos como tecnológicos. Algunos de estos aspectos tecnológicos fundamentales a considerar son las condiciones de trabajo de la pieza, el tipo de desgaste al que esta está sometida y las características de su material de fabricación. También ha sido mencionado, que para complementar este análisis, se tienen que considerar otros aspectos como la magnitud del desgaste, el estado de la superficie que se desea recuperar, el tamaño de la pieza, su geometría y los procesos de recuperación disponibles. Por último, se deben tener en cuenta los factores fundamentales a la hora de tomar decisiones, como lo son la información referente a los costes de la pieza, su necesidad industrial, económicos o social, los costes de los materiales y los costes de los procesos que van a ser necesarios.

2.1.3. Organización de la recuperación

Finalmente, aunque durante el desarrollo de los distintos métodos se observará cuando resulta más adecuada la aplicación de un método u otro, el proceso de recuperación requiere un procedimiento que estipule todos los pasos y su orden. Estos deben seguirse para devolverle a una pieza sus parámetros permisibles de trabajo. Según Silvia Rodríguez Colina (1993), para poder hablar de la recuperación de piezas, es necesario que la pieza haya perdido sus parámetros permisibles de trabajo, y que exista un proceso tecnológico que permita la restitución de dichos parámetros.

Este sistema organizativo, independientemente de su diseño, para que tenga un adecuado funcionamiento, tiene que garantizar los siguientes objetivos:

- Definir los defectos presentes en las piezas.
- Definir los procesos tecnológicos más adecuados para la corrección de cada uno de estos defectos.
- Organizar de acuerdo con cada defecto, o a la combinación de ellos, los grupos y / o partidas de producción y la secuencia a seguir.
- Hacer de dicha producción un hecho económico ventajoso.
- Dar la respuesta productiva en el momento necesario.

Esta organización de la recuperación es conocida comúnmente como “recuperación industrial”, por la similitud que presenta con la forma de producción de las grandes industrias. Por otro lado, hay que tener en cuenta que esta organización no está aislada, pues es un subsistema insertado dentro del esquema general de la organización de la recuperación y / o mantenimiento, cuyo objetivo final es servir a éstos. Es necesaria la adecuación de estos principios generales a las condiciones específicas de cada caso, para cumplir con los objetivos citados de forma coherente y armónica.

Otra de las circunstancias a tener en cuenta es la posibilidad de que una misma pieza puede poseer más de un defecto o una combinación de estos, por lo que será la frecuencia de aparición de estos y su forma de agrupación los determinantes de cuáles y cuántos recursos serán necesarios para hacer frente a su recuperación. Para ello, existe una formulación de la teoría de probabilidades que determina el número de combinaciones de defectos posibles, a partir de conocer la cantidad de los que posee la pieza. Estas relaciones porcentuales servirán, una vez elaboradas las cargas tecnológicas de cada defecto, para calcular los recursos materiales necesarios para la recuperación, la cantidad de puestos de trabajo que serán requeridos y las partidas que se deben ejecutar por cada ruta. De esta forma se evitan los cruzamientos o balances en la respuesta productiva a la recuperación.

Una vez se ha decidido la recuperación de la pieza, esta es almacenada y conservada hasta el instante en el que se procede a su recuperación. El almacenado y la conservación se lleva a cabo en un local que tenga las condiciones necesarias, por lo que garantice así la ubicación de las piezas en estantes debidamente identificados según el tipo, marca – modelo de equipo, tipo de defecto o su combinación.

En el caso de una planta de reparación general, una vez que se han determinado las rutas, este elemento, las estanterías, se pueden incorporar a la organización del almacén, facilitando así su organización, lo que conlleva a una ejecución de la recuperación más eficiente.

Para un mismo tipo de defecto es posible encontrar más de un método de recuperación. Para facilitar este proceso, la selección del método se hace forma racional, por lo que estará sujeta al cumplimiento de las siguientes premisas:

- Concordancia tecnológica del método con los requerimientos de la pieza.
- Utilización más racional y completa del equipamiento existente.
- Empleo de los dispositivos y herramientas en el régimen de trabajo óptimo.
- Utilización adecuada de cada uno de los puestos de trabajo a intervenir en el proceso.
- Coste de recuperación más bajo posible.

Una vez determinado el método o los métodos de recuperación a aplicar en cada caso, se procederá a la elaboración de un documento tecnológico operacional, también denominado “carta tecnológica de recuperación”. Su registro permitirá la construcción de unos indicadores unitarios de consumo, que permitirán la elaboración del plan de abastecimiento técnico material (ATM).

Este proceso es sometido a un control de calidad, para garantizar así la obtención de todas las premisas recién enumeradas. Este proceso se apoya en los documentos tecnológicos y en los medios e instrumentos de control requeridos en cada uno de los casos, debiendo ser efectuado con total rigor.

Los talleres especializados en la recuperación están organizados de tres formas posibles:

- Por tipo de piezas o métodos heterogéneos.
- Por método o piezas heterogéneas.
- Por agregados o piezas y métodos heterogéneos.

Todos los talleres trabajan de la misma forma, partiendo de la existencia de una masividad de piezas significativas y la prestación de un servicio a la recuperación del equipo, sin intervenir directamente en él. La pieza viene ya “defectada” por el usuario y el taller especializado en recuperación no interviene en dicha definición. Este “defectado” debe ser verificado por parte del taller en cuestión, certificando la información aportada por el cliente y los resultados obtenidos. Será aquí, donde se llevará a cabo la estadística de “defectado”, por la cual se determinarán los índices de recuperación, las rutas tecnológicas y las partidas por proceso. Llevando a una organización del almacén no sólo por defecto y combinación de defectos, sino también por la magnitud del desgaste, facilitando la recuperación por partidas.

La implantación del sistema de recuperación sin un esquema rígido, permitirá la aplicación de una forma avanzada de organización, pudiendo obtener los siguientes resultados:

- Reducción considerable de los costes en servicios de reparación y mantenimiento.
- Estabilización del suministro de piezas de repuesto.
- Introducción de formas de trabajo con productividad muy alta, garantizando la buena calidad y el ahorro en materias primas costosas y energía.

- Introducción de las técnicas computacionales para el control y selección de los métodos racionales de recuperación.

2.2. Recuperación de hierro fundido por soldadura

Los hierros fundidos son aleaciones de Fe y C, donde el contenido de este último oscila entre el 2 % y el 6,7 %, aunque en la práctica estará más limitado, encontrándose entre el 2,6 % y 3,7 %. El C no es el único elemento siempre presente en el hierro fundido, pudiendo haber Mn, Si, P y S, y en algunos casos incluso Ni, Cr, Cu, etc.

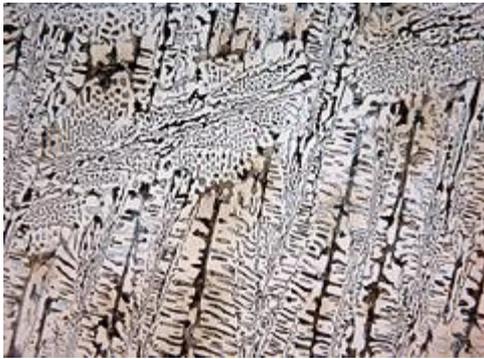
Aunque los hierros fundidos sean aleaciones de Fe y C, al igual que los aceros, ambos son diferenciables en varios aspectos:

- Mayor contenido en C.
- Puede aparecer en su estructura ledeburita, perlita, ferrita y grafito.
- Mayor contenido de Si, Mn, P y S.
- Menor punto de fusión (1150 °C), provocando una mayor fluidez.
- Poca capacidad para la deformación plástica.

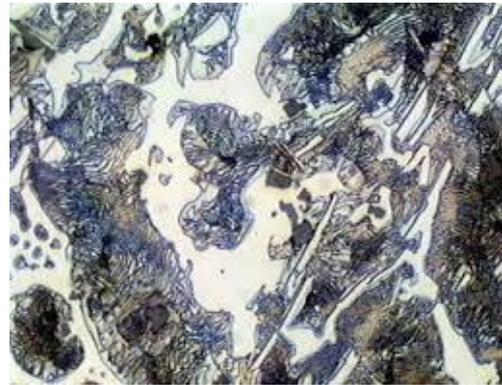
En los trabajos con hierros fundidos se pueden encontrar tres campos diferentes de aplicación. La recuperación de piezas con defectos de fundición, como poros, cavidades, picaduras, etc., aunque también son incluidas en este grupo aquellas que han sufrido defectos como consecuencia del proceso de maquinado y por errores en este. Por otro lado, la recuperación de piezas fundidas con grietas (roturas) o desgastes debidos al trabajo, encontrándose tanto piezas agrietadas o rotas durante su servicio como otras con desgastes superficiales. Y por último, el ensamblaje de piezas mediante soldadura, un caso muy aislado y excepcional.

Como ya se ha mencionado, existen diferentes hierros fundidos, en función del método de obtención y la forma del C en ellos, pudiendo encontrarse hierros fundidos grises, de alta resistencia o nodular, blancos, maleables y aleados con Cr, Ni, etc. Aunque será la cantidad de C combinado en forma de cementita, lo que determinará el tipo de hierro fundido del que se trata. Por lo que, la estructura y propiedades de los hierros fundidos dependerán de la composición química, la velocidad de enfriamiento y el tratamiento térmico.

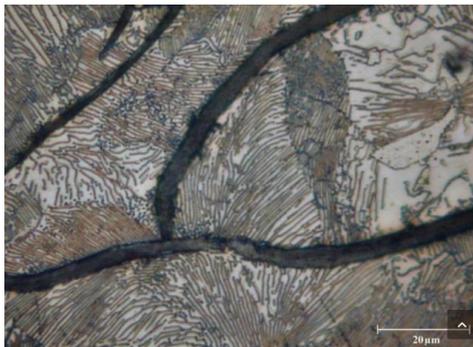
Los hierros fundidos están compuestos por una base metálica y grafito, pero es la base metálica la que aporta las propiedades mecánicas. Gracias a las diferentes posibilidades en las que se puede presentar la base metálica, se podrán encontrar diversos valores de las propiedades mecánicas. Estas bases metálicas pueden ser de diferentes formas según se muestra en la figura 2.2, mientras que la forma, tamaño, cantidad y distribución del grafito influirá en los valores de dichas propiedades.



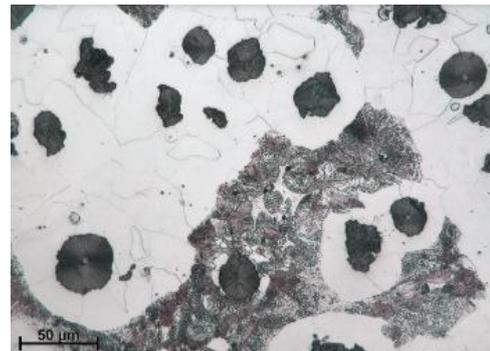
Ledeburita (Fuente: <https://www.wikiwand.com/es/Ledeburita>)



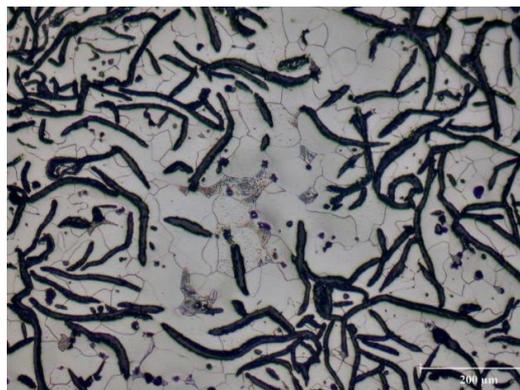
Atruchada (Fuente: <http://www.biltra.com/fundicion-atruchada/>)



Perlítica (Fuente: <http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/fundiciones-grises/>)



Perlítica – ferrítica (Fuente: <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/ductil>)



Ferrítica (Fuente: <http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/fundiciones-grises/>)

Figura 2.2. Microestructura de las bases de los hierros fundidos.

Por otro lado, el grafito, observado en la figura 2.3, disminuye las propiedades mecánicas de los hierros fundidos por producir la disminución de la sección metálica de la pieza, al ser considerado como una cavidad dentro de él por su resistencia nula y constituir un centro de concentración de tensiones. Sin embargo, le aporta algunas ventajas respecto al acero, como la facilitación de la elaboración al corte, una acción lubricante y el aumento de la resistencia a las vibraciones.

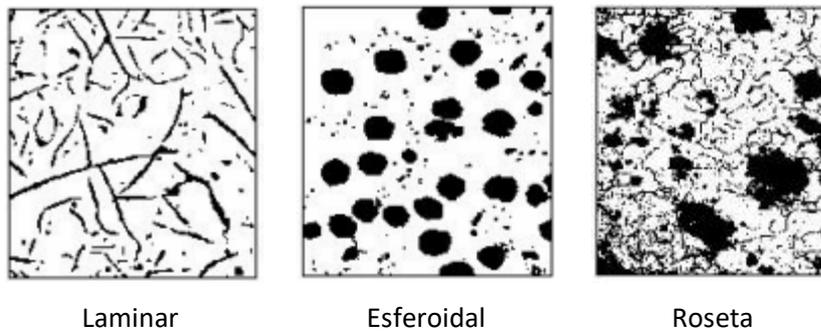


Figura 2.3. Formas del grafito.

(Fuente: <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7179/Concepci%C3%B3n%20Concepci%C3%B3n%20Esney.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

Otra consecuencia de la presencia de grafito, según Byron José Bonilla Chang (2015), es la reducción significativa de la capacidad para manejar las tensiones internas, la expansión y la contracción del material. Debido a la disminución más veloz de la temperatura del carbono respecto a la de la fundición. Las formas esferoidales facilitan la distribución del calor en el interior del material, permitiendo una mayor ductibilidad y la disminución del efecto del carbono.

En la fundición gris, el calor es distribuido de diferentes formas a lo largo de las hojuelas de carbono, influyendo significativamente en el comportamiento del material según las diferencias de temperaturas aplicadas, esto afecta a los procesos de soldadura al producir la aparición de fisuras o fracturas.

Tal y como comenta Héctor Rodríguez Pérez (1993), una vez conocido el hierro fundido se ve que la aplicación del proceso de soldadura a la recuperación de este tipo de piezas es un caso especial. Por lo que es necesario analizar los problemas de la soldabilidad de los hierros fundidos en sí y las condiciones de trabajo previas al reacondicionamiento, pues dificultan su recuperación mediante soldadura. Exceptuando los hierros fundidos blancos que no son prácticamente soldables, se presentarán problemas fundamentales y secundarios en el resto de hierros fundidos.

Los problemas fundamentales y secundarios que pueden aparecer en los hierros fundidos son:

- Surgimiento de grietas por las características fisicoquímicas del material, durante el calentamiento y enfriamiento de los hierros fundidos, y su relación con las propiedades mecánicas. Constituyendo un problema específico en la soldadura de los hierros fundidos. La presencia de grafito en forma laminar favorece el agrietamiento.
- Formación, más o menos localizada, de cementita o fundición blanca, tanto en la zona fundida como en la zona de influencia térmica. Siendo conocida como grano duro, por dificultar seriamente la maquinabilidad de los hierros fundidos.

Estos problemas son producidos al quemarse el Si, favoreciendo el fenómeno de la grafitización y causando un aumento de la velocidad de enfriamiento. Además pueden aparecer otros problemas:

- Formación de poros en la zona fundida como consecuencia del alto contenido en carbono, causando la formación de óxidos de carbono que no pueden escapar por su rápido enfriamiento.
- Formación de una película refractaria de óxido de Si y Mn durante el proceso de soldadura debido al alto punto de fusión con respecto al metal base.
- Alta fluidez de los hierros fundidos, aun siendo necesario para la fabricación, provoca la imposibilidad de soldar estos materiales en posiciones inclinadas, verticales y sobrecabeza.

Otro de los aspectos a considerar son las condiciones previas, pues en algunos casos pueden ocasionar problemas que dificulten la recuperación. Los más importantes son:

- El Crecimiento del Hierro Fundido Gris aparece cuando la pieza trabaja durante largos periodos de tiempo a temperaturas superiores a 400 °C, o al sufrir reiterados calentamientos por encima de esta, especialmente si sobrepasa los 800 °C. Esto provoca un aumento del volumen y la aparición de tensiones internas, lo cual resulta en la insolubilidad de estas piezas, debido a su agrietamiento durante el proceso de soldadura.
- La Infundibilidad aparece en piezas que han estado en contacto con aceites, grasas y agua de mar durante largos periodos de tiempo, debido a que se embeben o empapan de estas sustancias. Con el calor localizado de la soldadura salen a la luz, ocasionando la infundibilidad del metal. No se puede lograr un baño de soldadura correcto, pues las gotas del metal de aportación se disgregan o resbalan por la superficie de la pieza o bordes de soldadura. Para conseguir una adecuada soldadura, es necesario precalentarla la zona a soldar con una llama oxiacetilénica, permitiendo la salida de estas sustancias y evitándolo durante el proceso de soldadura. Pese a ello, son muchos los casos donde no se consigue solucionar el problema de este modo, siendo necesario realizar una soldadura con latón, pese a que sus propiedades mecánicas no son tan elevadas.
- El Quemado consiste en la oxidación, tanto superficial como interna, del material cuando trabajan a altas temperaturas (~ 400 °C). Se caracteriza por la presencia de óxidos visibles en toda la superficie de la pieza y por una oxidación interna. El óxido de hierro tiene mayor volumen que el hierro puro y produce el aumento de la dureza del material, que junto a la suciedad y rugosidad superficial dificultan su soldadura.

Para el dominio de la tecnología de soldadura en hierros fundidos, no basta con conocer el proceso de fusión de los metales base y de aportación, la forma correcta del cordón, etc., pues es necesario ser capaz de determinar el proceso tecnológico más adecuado para la obtención de una unión soldada de calidad, donde el precalentamiento presente un papel fundamental.

El precalentamiento se utiliza sólo cuando es indispensable y hasta la temperatura que sea necesaria. Cuando se decide precalentar un hierro fundido se hace en base a los problemas relacionados con su baja plasticidad y con los problemas metalúrgicos. Para la selección del tipo de precalentamiento, local o global, será necesario analizar si durante el calentamiento existe la libre dilatación, es decir, que no aparecerán tensiones residuales de compresión ni de tracción.

Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, no es necesario precalentar las piezas cuando exista la libre dilatación. Aunque para evitar la formación de la cementita, será necesaria la aplicación de un precalentamiento local, para realizar soldaduras de piezas grandes, será necesario aplicar un precalentamiento local a mantener durante el proceso de soldadura, logrando así su libre dilatación. Sin embargo, este tipo se debe dar de acuerdo a la forma de la pieza y en el lugar de la rotura.

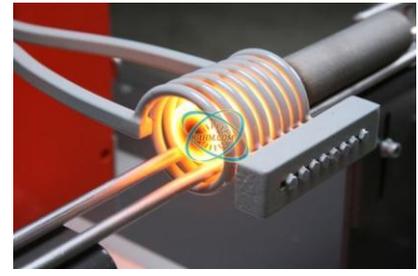
El precalentamiento local se puede observar en la figura 2.4, mientras que las formas de precalentamiento total se observan en la figura 2.5.



Llama de calentamiento (Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Calentamiento llamas.JPG](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Calentamiento_llama.JPG))



Hornos de llama (Fuente: <https://www.quiminet.com/articulos/los-hornos-industriales-en-sus-diferentes-procesos-2731520.htm>)



Inducción (Fuente: <https://www.uihm.com/es/Induction-Heating-Technology/What-is-Induction-Heating373.html>)

Figura 2.4. Formas de precalentamiento localizado.



Horno de resistencia eléctrica (Fuente: <https://www.juliomartineznavia.com/hornos-industriales-resistencias-electricas-tipos-y-usos/>)



Horno de fragua (Fuente: <http://ficeps3.com/los-hornos-de-forja/>)



Pozo de calentamiento (Fuente: <https://spanish.alibaba.com/g/pit-type-carburizing-furnace.html>)

Figura 2.5. Formas de precalentamiento total.

En el precalentamiento local, la temperatura no debe sobrepasar los 300 °C, aunque la magnitud exacta dependerá de la deformación requerida. Por el contrario, en el precalentamiento total, la temperatura depende de la rigidez de la pieza, del método de reacondicionamiento, y, de la posición y dimensiones del defecto. En algunos casos se procederá de forma contraria, es decir, se seleccionará el método de recuperación en base a la posibilidad de calentamiento disponible.

De manera general, a las piezas de menor rigidez (no completamente cerradas, con paredes no reforzadas o que admiten cierta deformación a flexión) se les recomienda una temperatura de entre 300 y 400 °C. Y para piezas de mayor rigidez (bloques de motores, cuerpos de bombas, etc.) una temperatura de entre 600 y 800 °C.

En soldaduras fuertes, se recomienda la temperatura de precalentamiento a la mitad de la recomendada respecto a la rigidez de la pieza, debido a la menor temperatura de trabajo de éste método y a la posibilidad de deformación del metal de aportación. En el caso de piezas con grietas, la recomendación será en función de la colocación, forma y dimensiones de la grieta o rotura.

Otros de los aspectos previos a considerar, es la composición química del material de aporte, aunque en algunos de los diferentes métodos de soldadura se va a especificar el material de aporte a emplear, en base a los estudios de Byron José Bonilla Chang (2015), la composición química del material de aporte varía según las fundiciones de hierro, siendo diferente al material de la base, conociéndose como soldaduras heterogéneas. Los materiales de aporte seleccionados pueden ir desde el acero hasta el níquel, incluyendo aleaciones de monel (70 % Ni y 30 % Cu) y aceros inoxidable (Cr y Ni), pues gracias a las características aportadas por el níquel durante la soldadura es uno de los más adecuados para este proceso.

Las especificaciones AWS 5.15 reconocen cuatro tipos de electrodos empleados en las soldaduras de hierro fundido y que se indican en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Electrodos para soldadura de hierro fundido.

TIPO AWS	C %	Mn %	Si %	Fe %	Ni %	Cu %	Otros
ENi – Cl	2,00 máx.	2,50 máx.	4,00 máx.	8,00 máx.	85 mín.	2,50 máx.	1,00 máx.
ENiFe – Cl	2,00 máx.	2,50 máx.	4,00 máx.	9,50 / 45 máx.	45 / 60 mín.	2,50 máx.	1,00 máx.
ENiCu – A	0,35 / 0,55 máx.	2,55 máx.	0,75 máx.	3,00 / 6,00 máx.	50 / 60 mín.	35 / 45 máx.	1,00 máx.
EniCu - B	0,35 / 0,55 máx.	2,55 máx.	0,75 máx.	3,00 / 6,00 máx.	60 / 70 mín.	25 / 35 máx.	1,00 máx.

Para los trabajos de soldadura en fundiciones de hierro, se recomiendan los electrodos de níquel ENi – Cl, variando según los niveles de dureza, el tipo de pieza y la función que desempeñe, el porcentaje de níquel y de los otros elementos agregados para cada caso. La importancia de la utilización del níquel, se debe a su capacidad para evitar la fisura por la aparición de fases duras y frágiles, su alta elongación (tanto a dilatación, como a contracción), su maquinabilidad y la menor entrada de calor.

Héctor Rodríguez Pérez (1993) señala en su libro que los materiales de aporte empleados son divididos, a su vez, en electrodos, varillas y fundentes. Por otro lado, Helber Giovanni Chambi Paucar (2014) comenta en sus estudios que es muy habitual el uso de electrodos revestidos, como en el caso de las soldaduras por arco eléctrico. Los electrodos revestidos están constituidos por un interior metálico, de forma cilíndrica, revestido por una composición química muy variable, como es observable en la figura 2.6.

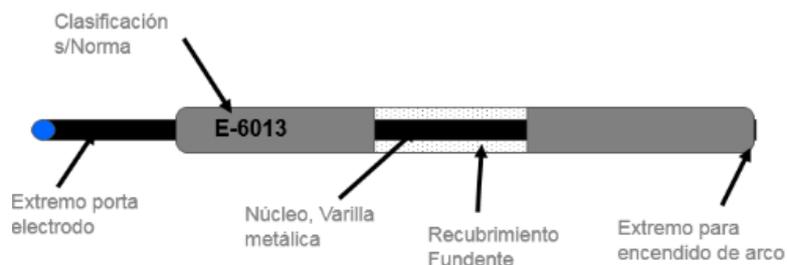


Figura 2.6. Electrodos revestidos. (Fuente: <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm>)

La composición de los revestimientos es muy compleja, se trata de mezclas de materiales orgánicos y minerales, donde cada sustancia juega una función determinada, tanto durante la fusión como en la solidificación.

Algunas de las funciones que desempeñan dichos recubrimientos, son:

- Dirigir el arco, garantizando una fusión equilibrada y uniforme.
- Estabilización del arco eléctrico.
- Creación de gases que actúan como protección, evitando la entrada de oxígeno y nitrógeno.
- Producción de escoria que cubre el metal de aporte, evitando su enfriamiento brusco y el contacto de la zona tratada con Oxígeno y Nitrógeno.
- Contiene determinados elementos para garantizar una buena fusión de los distintos tipos de materiales.
- Aporta algunos de los elementos químicos encargados de aportar las características deseadas al metal depositado.

Existen diversos revestimientos en el caso de soldaduras de aceros al carbono, que vienen especificados por la AWS A5.1. Se puede encontrar revestimientos como electrodos celulósicos, electrodos de rutilo o los electrodos básicos (los componentes principales son carburo cálcico y fluoruro).

Héctor Rodríguez Pérez (1993) también señala en su libro que al hablar de recuperación, se hace referencia tanto a la unión de piezas fracturadas y agrietadas, como a la reconstrucción de superficies desgastadas.

Los hierros fundidos grises son los más empleados en la producción de piezas. Para su recuperación son empleados los procesos de soldadura manual con arco eléctrico y con llama oxiacetilénica, según las características del trabajo a desarrollar.

En la soldadura manual por arco eléctrico, observable en la figura 2.7, generalmente se emplea la soldadura en frío, garantizando una temperatura en la pieza inferior a 60 °C.

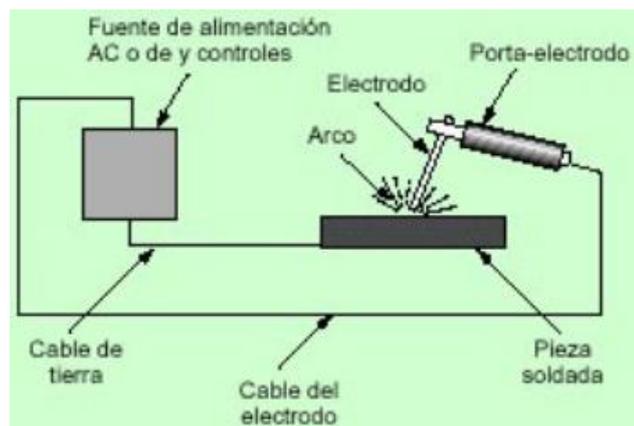


Figura 2.7. Esquema del proceso de soldadura manual por arco eléctrico. (Figura:

https://www.insst.es/InsstWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTécnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_494.pdf)

Será necesario realizar una correcta preparación de la pieza, limpiando las superficies a soldar (eliminando todo rastro de grasas, aceites, suciedades, pinturas, etc.) al menos hasta unos 25 mm del extremo de la costura, se eliminará todo el material sucio mediante un disco abrasivo o un cincel hasta obtener un acabado de brillo metálico. Además, se debe hacer uso de un cepillo metálico, aunque se podrán eliminar las grasas y aceites mediante el tetracloruro de carbono o el tricloro etileno.

Al eliminar grietas, será necesario realizar un taladrado con una broca de 3 mm de diámetro en los extremos de la grieta. Las grietas y rajaduras serán eliminadas con discos abrasivos o con electrodos de ranurar, mientras que en el caso de roturas, se corrigen los bordes para que no presenten cantos vivos.

Durante el proceso de soldadura se deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Someter la pieza a un precalentamiento.
- Se deberá soldar en posición plana, con electros de pequeño diámetro y con las menores intensidades de corriente eléctrica posibles, empleando corriente eléctrica directa con polaridad invertida (excepto si el fabricante indica lo contrario).
- Se deberá mantener un arco corto.
- El lugar tiene que estar libre de corrientes de aires.
- Se deben obtener capas sin poros (si aparecen se deben eliminar).
- Se seleccionarán electrodos a base de Ni puro y Ni – Fe, también podrán ser a base de Ni – Cu, acero inoxidable, etc. Según Rafael Quintana Puchol (2001), han podido obtener, a partir de las arenas negras de Mejías, una aleación compleja constituida por elementos alfégenos y gammágenos, con un amplio campo de aplicación en este tipo de soldaduras.

Continuando con lo señalado por Héctor Rodríguez Pérez (2013), se garantizará tras la operación de soldadura, el enfriamiento lento. En algunas ocasiones, antes del enfriamiento se le dará un tratamiento térmico para eliminar las posibles tensiones residuales.

La soldadura manual con llama oxiacetilénica, mostrada en la figura 2.8, es una soldadura en caliente, con una transferencia de calor lenta y uniforme, favoreciendo la grafitización del material.



Figura 2.8. Recuperación mediante soldadura manual con llama oxiacetilénica. (Fuente: <https://www.castolin.com/es-MX/nuestras-tecnologias>)

La soldadura en caliente se caracteriza por:

- Utilización de una llama neutra (reductora) o ligeramente carburante.
- La pieza se debe calentar durante todo el proceso (estando entre 250 y 500 °C). Se recomienda el método de soldadura a izquierda, garantizando el precalentamiento.
- Los materiales de aportación recomendados son tanto hierros fundidos como aleaciones a base de Cu, garantizando el empleo del fundente adecuado.
- Se debe aplicar un tratamiento de liberación de tensiones al final del proceso (como calentar la pieza a 600 °C) y no deben existir corrientes de aire.

Cuando la soldadura en caliente es aplicada en piezas impregnadas en aceites, como presentan infundibilidad, se calentará la pieza con una llama oxiacetilénica a unos 500 °C durante un tiempo variable (según el tamaño y la intensidad de impregnación). Si no se ha conseguido evitar, se depositarán cordones de soldadura por arco eléctrico y siendo eliminados mediante cincel y martillo, repitiendo la operación hasta evitar el problema. Estas soldaduras se deberán hacer con electrodos alternos a base de Fe y Ni o Ni – Fe.

Si se trata de soldar piezas fatigadas o quemadas, se deberá limpiar la superficie del material de todo vestigio de óxido y suciedad, con un cepillo metálico, y realizar el cebado con el electrodo apropiado, rayando la superficie de manera repetida y utilizando un electrodo a base de Ni – Fe.

Existen otros métodos aplicables de soldadura, como son los siguientes (Roque Fernando Barron Guardia, 2003):

- Soldadura por arco abierto.

En estas la fusión del metal se produce gracias a un arco eléctrico, establecido entre el extremo del alambre aportado, de forma continuada, y la pieza a soldar. La fusión del metal obtenido está protegida por un gas suministrado de forma simultánea con el alambre, tal y como se observa en el dibujo explicativo de la figura 2.9.

Los gases empleados para la protección, pueden ser inertes (Helio o Argón) o activos (CO₂ o mezcla de gas inerte con CO₂ u O₂).

Gracias al gas protector se garantiza una mayor tasa de deposición, respecto a los métodos vistos anteriormente. Este método proporciona una soldadura de excelente calidad, con bajo contenido en H, en casi todos los metales y aleaciones empleadas, por lo que se elimina la necesidad de mecanizar los restos de escorias.

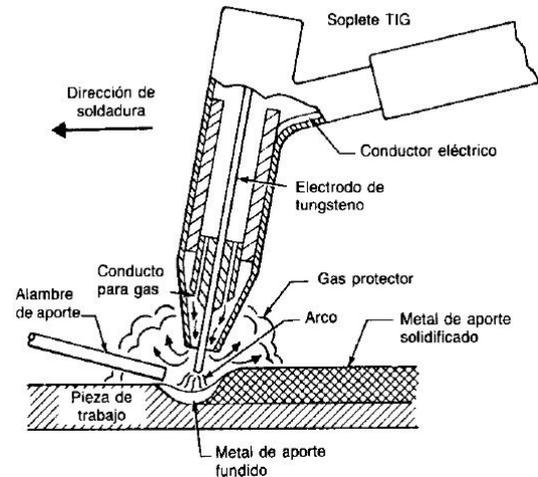


Figura 2.9. Soldadura por arco abierto. (Fuente: <https://tareasuniversitarias.com/soldadura-por-arco-con-gas-protector.html>)

- Soldadura por arco sumergido.

En estas soldadura, el arco y el metal fundido están sumergidos bajo una cubierta de fundente granular sobre la pieza a soldar, observable en la figura 2.10, y durante toda la operación lo que permite la automatización o semiautomatización del método.

Garantiza una alta tasa de deposición de metal y una alta calidad en la soldadura, bajo el coste de unas instalaciones con unos fuertes requerimientos y la necesidad de un equipo bastante costoso.

Pese a ello, es un método ampliamente usado en la recuperación de aceros al carbono, aceros de baja aleación y aceros inoxidables.

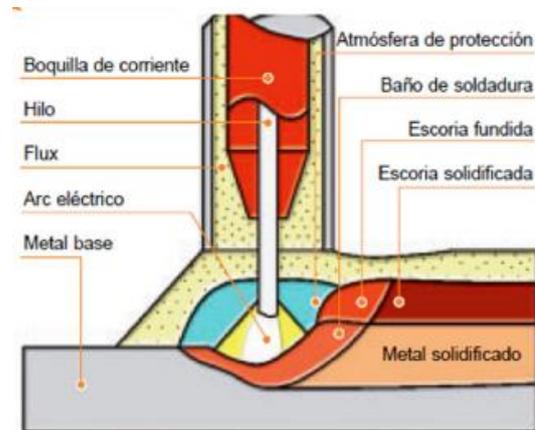


Figura 2.10. Soldadura por arco sumergido (Fuente: <https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20por=20Arco=20Sumergido=20Curso=20Completo.pdf>)

Según Héctor Rodríguez Pérez (1993), también puede darse la necesidad de recuperar piezas de otros tipos de hierros fundidos de alta resistencia y maleables (los hierros fundidos blandos no son recuperables por ser insoldables), pudiéndose aplicar los mismos pasos tecnológicos generales de las soldaduras en frío y en caliente de los hierros fundidos grises.

Las piezas de hierros fundidos de alta resistencia (nodular) pueden ser soldadas mediante arco eléctrico, con electrodos a base de Ni, cuando el empotramiento de la grieta o rotura sea poco, y con ENiFe, cuando sea grande. Siendo necesaria la aplicación de un tratamiento térmico inmediatamente después de la soldadura. Sin embargo, la soldadura con llama oxiacetilénica de estos materiales es más difícil, debido a la gran cantidad de poros producidos por la ebullición del Mn, necesitando la aplicación de un precalentamiento y un tratamiento térmico posterior.

Para la soldadura de piezas de hierros fundidos maleables, estas deben precalentarse y usar electrodos secos de ENi y ENiFe. Sin olvidar la necesidad de aplicar un tratamiento térmico posterior.

En relación con este tema, Horacio Guzmán López (2011) señala la existencia de otro tipo de soldadura empleada en la recuperación. Esta se trata de la soldadura láser, la cual presenta mayores ventajas en el recubrimiento de componentes desgastadas, gracias a que la operación de fusión puede o no utilizar material de aporte. Mediante un haz de luz, se centra en áreas bien definidas, imposibles de conseguir con ningún otro método, lo que permite que la zona afectada por el calor sea menor, eliminando la necesidad de someter la pieza a tratamientos de pre y post calentamiento. Los inconvenientes de este método son la necesidad de equipos más caros y la presencia de cierto grado de porosidad e inestabilidad en la soldadura, debido a la rápida solidificación.

Conocidas estas tecnologías, Byron José Bonilla Chang (2015) menciona que el proceso de recuperación no termina aquí, ya que es necesario llevar un control del enfriamiento de la pieza, para garantizar que se lleve a cabo lentamente con el fin de minimizar la aparición de tensiones residuales. Para ello habrá que regular la velocidad de enfriamiento de la pieza, gracias a la aplicación de diferentes métodos, como enterrarla en arena o vermiculita, post – calentarla con una antorcha para luego enfriarla lentamente, post – calentarla con la ayuda de hornos, cubrir la fundición con una manta aislante, enterrarla en cal, etc.

Gracias a todas estas consideraciones serán varios los beneficios obtenidos, como la mejora de la ductibilidad de la ZAC, mejora del mecanizado de la zona de soldadura y la ZAC, transformación de la martensita formada durante la soldadura en una fase menos frágil (martensita revenida), alivio de las tensiones residuales, etc.

Algunos ejemplos de piezas recuperadas mediante soldadura, según Roque Fernando Barron Guardia (2003), son: cruces de vías férreas, cucharas de un cargador frontal (figura 2.11), ruedas guías de tractores (figura 2.12), ruedas dentadas, ruedas guías, zapatas de orugas, mandíbulas de trituración, asientos de válvulas, paletas mezcladora, uñas de cuchara de excavadora e, incluso, brocas de perforación tricono.

2.3. Recuperación por proyección térmica

Tal y como comenta Gonzalo Pérez Fuentes (1993), esta es una técnica que busca recubrir las superficies desgastadas mediante la proyección de material, derretido o fundido, sobre estas. El material se proyecta a altas velocidades y en función del tipo, puede estar fundido o derretido, dentro o fuera del equipo de proyección. Durante la operación no se produce la fusión de las superficies de las piezas, como si sucede en los procesos de recargue duro y rellenado por soldadura. En la figura 2.13 se muestra un esquema de dicho método.



Figura 2.11. Reparación por soldadura de una cuchara frontal (Fuente: <https://www.solysol.com.es/productos-y-servicios/procesos-soldadura/soldadura-de-reparacion-recargue-fundicion-y-acero-inoxidable/>)



a)



b)

Figura 2.12. Reparación de ruedas guías. (Fuente: <https://tractocentro.com/servicios/reparacion-de-trenes-de-rodaje/>)

a) Antes reparación.

b) Después reparación.

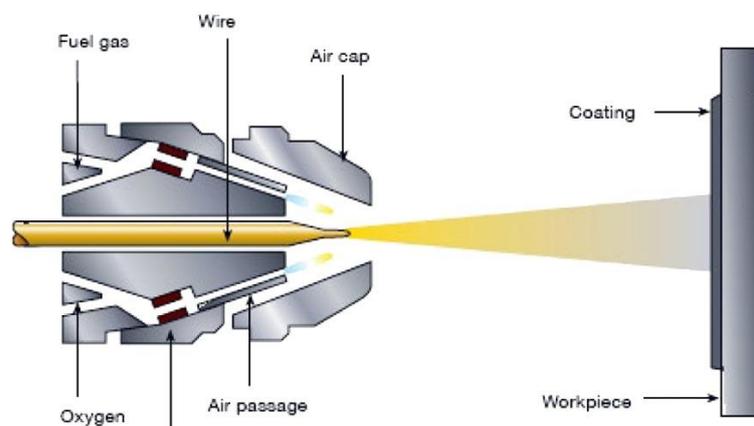


Figura 2.13. Recuperación de superficie por proyección térmica. (Fuente: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/156162-Recubrimientos-mediante-proyeccion-termica-comparativa-frente-a-otras-tecnologias.html>)

Los métodos de proyección térmica son de fácil aplicación gracias a la buena adherencia y resistencia al desgaste de los materiales usados. Se realiza a bajas temperaturas y en espacios de tiempos muy breves, garantizando la no introducción de cambios estructurales en el metal base, además de muy pocas distorsiones o deformaciones debidas a la acumulación de tensiones provocadas por los ciclos térmicos de dilatación – contracción, típicos de los procesos de soldadura. Sus principales desventajas respecto a los métodos de recargue, son la baja resistencia mecánica y la adherencia.

Diego Mauricio Osorio Azate (2017) muestra en su estudio que estas ventajas son debidas a diversos aspectos de la dinámica de la evolución de la cobertura durante la proyección, como los aspectos físicos en la formación de las salpicaduras con la difusión de la gota fundida, las interacciones con el sustrato, etc. Estas características están afectadas por la temperatura en el momento del impacto de la gota, su viscosidad, tensión superficial, etc. Por último, la morfología del impacto dependerá de la velocidad de las partículas, temperatura, diámetro y superficie del perfil del sustrato, entre otros.

La aplicación de este método se ha extendido desde la protección de una gran variedad de materiales, hasta aumentar la vida útil de las piezas de máquinas y / o equipos, cuyas superficies están sometidas a condiciones severas de trabajo, incluso han llegado a aplicarse en reparaciones de ejes desgastados, protección contra la corrosión, etc.

Según Gonzalo Pérez Fuentes (1993), los usos de la proyección térmica son muy variados, al igual que sus clasificaciones. Estos se pueden dividir según la forma del material a proyectar en métodos de producción y fuentes de energía, también se clasifican según la forma del material a proyectar, en proyección por alambre (macizo o tubular) y por polvos (metálicos, cerámicos y plásticos). Según el método de producción se clasifica en semimecanizado, mecanizado y automatizado.

La clasificación con mayor importancia es según el tipo de fuente de energía empleada. Los tipos de métodos según esto son:

- Proyección por baño fundido.

Caracterizado por usar varillas o lingotes de bajo punto de fusión, permitiendo su fundición en un recipiente, calentado eléctricamente y proyectado en forma de chorro a alta velocidad, con la ayuda de un gas atomizador (aire comprimido) precalentado.

- Proyección a la llama.

El material (polvo, varilla, cordón o alambre fundido) se proyecta a alta velocidad sobre la superficie gracias a una mezcla de gas combustible – oxígeno, que a su vez puede estar siendo impulsada por un gas atomizador, (figuras 2.14 y 2.15). Roque Fernando Barron Guardia (2003) señala que el material es fundido previamente mediante una llama. Como consecuencia del impacto las partículas se aplanan, entrelazan y traslapan, quedando finamente unidas y formando un recubrimiento denso y coherente. Gracias al gas que acompaña al material fundido, se evita el excesivo calentamiento de la zona que está siendo recubierta. Habitualmente, se usa una llama oxiacetilénica, pero también es posible el uso de otras llamas, como la oxihidrógeno.

En la figura 2.16. se puede una recuperación lleva a cabo gracias a la soldadura mediante proyección a la llama.

- Proyección por detonación.

Según Gonzalo Pérez Fuentes (1993), el revestimiento se obtiene bajo el principio del funcionamiento de una cámara de combustión, es decir, el calentamiento del agente de proyección y producción del gas atomizador. La combustión de la mezcla de gas combustible – oxígeno es

iniciada mediante ignición por bujía, manipulando las válvulas de entrada de los diferentes compuestos para que el proceso sea intermitente. Buscando que las mezclas de los gases sean utilizados de manera que la reacción ocurra bajo condiciones explosivas, donde el agente proyectado es acelerado por la onda explosiva y proyectado a gran velocidad, como muestra el esquema de la figura 2.17.

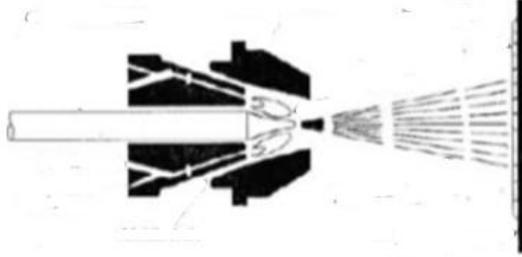


Figura 2.14. Proyección térmica por llama con alambre. (Fuente: <https://es.slideshare.net/deibyrequenamarcelo/01-proceso-recubrimientos-proyeccion-termica>)

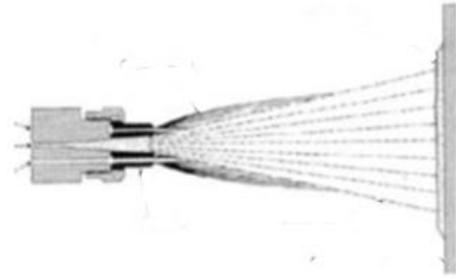


Figura 2.15. Proyección térmica por llama con polvo. (Fuente: <https://es.slideshare.net/deibyrequenamarcelo/01-proceso-recubrimientos-proyeccion-termica>)



a)



b)

Figura 2.16. Eje recuperado por proyección térmica por llama. (Fuente: <https://es.slideshare.net/deibyrequenamarcelo/01-proceso-recubrimientos-proyeccion-termica>)

a) Eje dañado.

b) Eje recuperado.

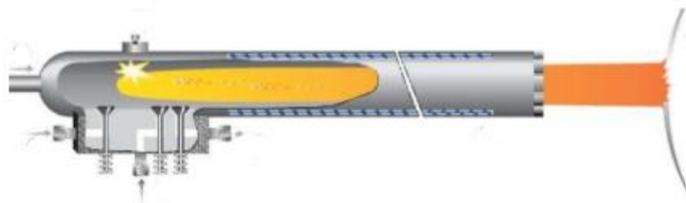


Figura 2.17. Proyección por detonación. (Fuente: <https://es.slideshare.net/deibyrequenamarcelo/01-proceso-recubrimientos-proyeccion-termica>)

- Proyección por arco eléctrico.

La aportación del material en forma de alambre fundido mediante un arco eléctrico y proyectado sobre la superficie gracias a un gas atomizador (aire comprimido). Este arco eléctrico entre los alambres – electrodos, es producido por la diferencia de tensión y el contacto de ignición, (figura 2.18).

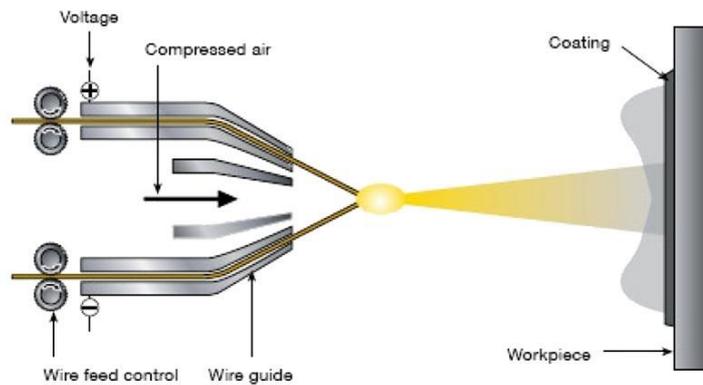


Figura 2.18. Proyección por arco eléctrico.

(Fuente: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/156162-Recubrimientos-mediante-proyeccion-termica-comparativa-frente-a-otras-tecnologias.html>)

Esta tecnología produce una alta eficiencia de deposición y buena adherencia, con un coste de operación relativamente bajo, como muestra en su estudio Mauricio Osorio Azate (2017). Las formas industriales más empleadas actualmente, son las que consiguen recubrimientos con alta adherencia y bajas porosidades, obteniéndose capas densas.

Su mayor inconveniente es la porosidad, estos revestimientos tienen una porosidad moderada o alta. Los poros, no son grandes, tienen una naturaleza de interconexión, pudiendo acelerar la falla por corrosión del revestimiento debido al área de contacto más grande. Pese a este inconveniente, es un proceso muy simple y que permite el rociado de una amplia gama de metales, aleaciones y compuestos de matriz metálica en alambre, además, de una limitada gama de capas de cermet (carburos de tungsteno u otros materiales duros). También se pueden rociar en forma de alambre como matriz metálica, donde la fase de cerámica dura, en forma de polvo fino, es ensamblada en el interior de una envoltura tubular de metal.

Este método posee una alta velocidad de aspersión alcanzándose velocidades de deposición de hasta 60 kg / h en algunas aleaciones. En este destaca su elevada eficiencia, pues toda la energía eléctrica en la antorcha es usada para fundir el metal. Todo ello le concede la posesión del índice más alto de deposición entre los diferentes procesos de rociado térmico, utilizándose en el rociado de grandes áreas y en una gran cantidad de componentes de la cadena productiva o en operaciones repetitivas. Es muy habitual su uso en la recuperación de cojinetes y ejes, mediante aleaciones de acero y bronce.

- Proyección por plasma.

Volviendo a Gonzalo Pérez Fuentes (1993), este señala que, al igual que es observable en la figura 2.19, el material de aportación viene en forma de alambre o polvo fundido dentro o fuera de la pistola de proyección, proyectado por un chorro de plasma a alta velocidad sobre la superficie.

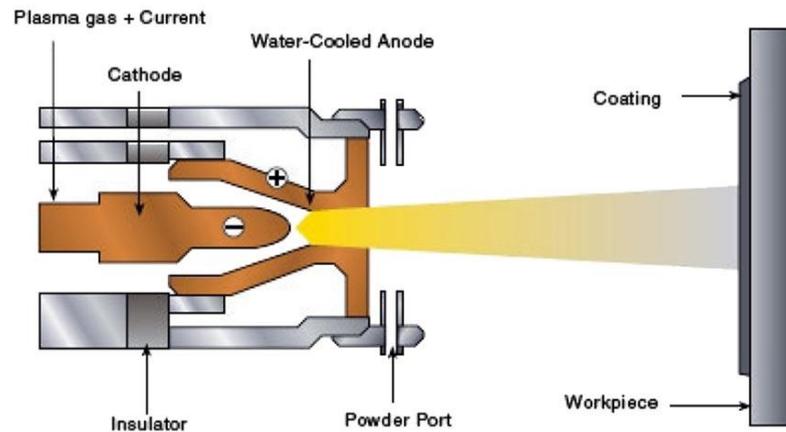


Figura 2.19. Proyección por plasma. (Fuente: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/156162-Recubrimientos-mediante-proyeccion-termica-comparativa-frente-a-otras-tecnologias.html>)

El plasma se produce gracias a un arco encendido en un gas o mezcla de gases. Este se ve acelerado y concentrado, y, sale por boquilla de proyección como un haz plasmático de alta densidad energética.

Diego Mauricio Osorio Azate (2017) aclara que esta técnica también puede usarse en cámaras de vacío. Debido a las presiones alcanzadas en el interior (de 10 a 50 kPa), el plasma se expande en longitud y diámetro, y con la ayuda de una boquilla especial, se aporta gas a alta velocidad arrastrando las partículas hacia la zona de trabajo. Gracias a la ausencia de oxígeno y a la posibilidad de operar con temperaturas de sustrato superiores, se produce un tipo de recubrimiento más denso y adherente, sin formación de óxidos, que mantiene la composición química de las partes originales. La velocidad alcanzada por las partículas proyectadas es del orden de los 1000 m / s, por lo que altera las propiedades mecánicas del depósito incrementando la fuerza de cohesión y reduciendo la porosidad.

- Proyección por inducción.

Es sabido por Gonzalo Pérez Fuentes (1993) que el material proyectado es alambre o varilla fundida por campos alternativos de alta frecuencia y proyectados en la superficie gracias a un gas atomizador (aire comprimido), esto puede verse en la figura 2.20, que está a continuación.

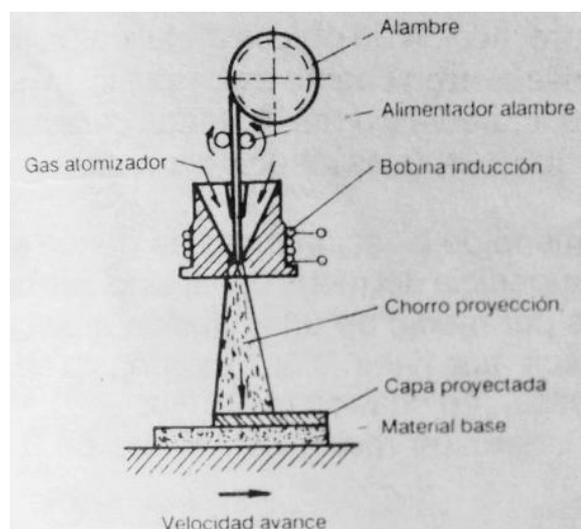


Figura 2.20. Proyección por inducción. (Fuente: Manual de recuperación de piezas)

- Proyección por explosión de alambre (descarga de condensador eléctrico).

El material a proyectar viene en forma de alambre, siendo rápidamente vaporizado por la descarga de energía acumulada en un condensador eléctrico, ver figura 2.21. Las finas partículas esparcidas son lanzadas hacia la superficie de la pieza en una nube gaseosa. El proceso es discontinuo.

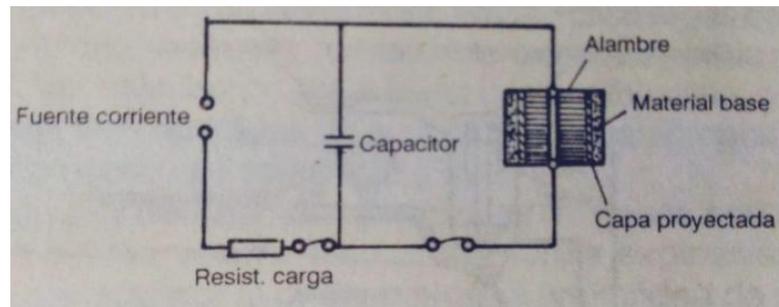


Figura 2.21. Proyección por explosión de alambre mediante descarga de condensador eléctrico.

(Fuente: Manual de recuperación de piezas)

Los métodos con mayor aplicación práctica en la industria son la proyección térmica por llama de gas, por arco eléctrico, por arco de plasma y por detonación. La proyección térmica por llama de gas y por arco eléctrico poseen mayor difusión y versatilidad. Por otro lado, la proyección térmica por arco de plasma y por detonación son los más novedosos, y aún estando en desarrollo, logran las mayores propiedades en las capas depositadas. Diego Mauricio Osorio Azate (2017) explica que la proyección térmica por arco de plasma en el interior de cámaras de vacío está permitiendo el empleo de materiales de alto punto de fusión, generando las conocidas barreras térmicas sobre elementos usados en la industria de generación eléctrica y aeroespacial. Pues un recubrimiento cerámico de 1 – 200 μm puede reducir la temperatura hasta en unos 200 $^{\circ}\text{C}$.

Inicialmente los métodos más empleados por la industria fueron la proyección por llama de gas oxiacetilénica y la proyección por arco eléctrico con alambre, sin embargo, estos han sido sustituidos por el desarrollo de la proyección a la llama con polvos en caliente y con polvos en frío, estos métodos son los explicados a continuación (Gonzalo Pérez Fuentes, 1993):

- Proyección a la llama con polvos en caliente.

Durante este método, se produce un fenómeno de aleación metálica, donde el metal de aportación no sólo fluye por la superficie del metal base, sino que aparece una interunión entre ambos, gracias a la aparición de una difusión molecular en fase sólida. Esto permite la realización de depósitos muy finos ($\sim 0,007$ mm) de hasta de varias capas y mm de espesor.

Basándose en la proyección de polvos metálicos, diseñados y obtenidos con características especiales en cuanto a composición química, puntos de fusión, pureza, densidad aparente y otras características fisicoquímicas, estos ofrecen gran cantidad de ventajas respecto al uso de varillas y electrodos convencionales.

Los polvos empleados poseen una temperatura de fusión muy elevada, encontrándose la temperatura de "liga" muy próxima a los 1150 $^{\circ}\text{C}$. Suelen usarse polvos de aleaciones a base de Ni aleados al C, Cr, B, Si y otros elementos como el Fe o el W, así como aleaciones a base de Co y Cu, donde su "ligadura" al metal base ocurre a temperaturas superiores a las de algunos puntos de transformación.

Este método suele aplicarse en metales ferrosos y Ni, Cu y sus respectivas aleaciones, aunque no se puede aplicar sobre metales blancos o blandos ni tampoco sobre latones. Las técnicas de aplicación son la de rociado y la de cordones, donde el único requerimiento es una limpieza previa de la superficie o rellenado, efectuándose mediante métodos de desengrase tradicionales y esmerilado con muelas abrasivas o preparación por chorro de arena.

La técnica del rociado resulta recomendable en el rellenado de cantos vivos, biseles, etc., en piezas como asientos de válvulas de motores, cuchillas, bordes de capas e impelentes de bombas, poleas, puntas de dientes de piñones, etc. En algunas ocasiones, debido a las excelentes propiedades y características de los polvos, es recomendable su uso como base para trabajos de soldadura en condiciones difíciles.

Desde el punto de vista económico, se recomienda rellenar los grandes desgastes previamente con electrodos revestidos no especiales.

- Proyección a la llama con polvos en frío.

Esta permite obtener la solución requerida en piezas con simetría de revolución (su aplicación es fundamental sobre cuerpos cilíndricos y ejes) e incluso de grandes diámetros, sin deformaciones ni cambios en la estructura de los metales. También se emplea para la deposición de aleaciones especiales contra el desgaste de forma preventiva.

Permite mantener la temperatura de la pieza por debajo de los 250 a 300 °C y las partículas de polvos fluyen a través de un soplete especial, aunque también pueden caer directamente sobre la llama oxiacetilénica, siendo lanzadas en estado de fusión o semifusión sobre la superficie. La adherencia se produce mediante una microsoldadura con el metal base.

Las aleaciones pueden resolver los problemas de fricción metal – metal, al ser diseñadas con porosidades controladas, coayudando a la lubricación y produciendo una disminución de los coeficientes de fricción, así como para presentar una alta resistencia a la corrosión.

Son empleados polvos de aleaciones metálicas, cerámicas, metalocerámicas y plásticos de diferentes composiciones, según el soplete usado. Esto va a requerir de una preparación previa de limpiado y una preparación especial para aumentar la adherencia del metal proyectado. Por lo que casi todas las aleaciones usadas requieren la proyección inicial de una fina capa de polvo base, para que esta sirva de ligamento, aumentando la adherencia y asegurando una mayor unión.

Las dimensiones máximas que se van a poder rellenar dependen del tipo de polvo. Los depósitos con espesores superiores a 3 mm van a necesitar medidas adicionales para evitar fracturas, desprendimientos, etc.

Este método permite un amplio campo de metales sobre los que es posible su aplicación, incluso el Al y sus aleaciones, aunque no se puede ser empleado sobre piezas de Cu puro.

La proyección térmica, según José Luddey Marulanda Arévalo (2014), viene aumentando su reconocimiento en grandes segmentos industriales, como la industria automovilística, electrónica y petroquímica, entre otras. Pues el uso de revestimientos cerámicos duros sobre componentes, como en el caso de extrusoras de tubos plásticos, fabricados en acero inoxidable, es de gran importancia y versatilidad para la recuperación de piezas o en el aumento de la vida útil de estos componentes y equipos. Son muchas las industrias que usan la proyección térmica para aumentar el funcionamiento y reducir los costes de producción y mantenimiento en ambientes altamente erosivos o corrosivos.

Además, se trata una técnica capaz de reemplazar procesos de manufactura contaminantes como el del cromo duro.

Aunque son utilizados exitosamente, no se tiene una completa comprensión de los procesos metalúrgicos que tienen lugar durante la proyección térmica para los múltiples sustratos a los que se aplican estos recubrimientos. Básicamente se forman por unión partícula – partícula del metal aportado, resultando formar una capa superficial cuya estructura es altamente anisotrópica, donde la evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas resulta aún compleja.

Uno de los ejemplos de la aplicación de dicha tecnología es la reconstrucción de émbolos de bomba hidráulica de la industria petrolera por proyección térmica con aleaciones auto fundentes Ni – Cr – B – C, tal y como se puede ver en la figura 2.22.



Figura 2.22. Reconstrucción de émbolos de bomba hidráulica de la industria petrolera por proyección térmica con aleaciones auto fundentes Ni – Cr – B – C. (Fuente: <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250639009.pdf>)

- a) Émbolo dañado.
- b) Émbolo reparado.

En la industria siderúrgica hay fuertes desgastes por fricción metal – metal, donde piezas como las bobinadoras de trefilado se desgastan rápidamente. La recuperación por proyección térmica por arco eléctrico casi le duplica la vida útil de bobinado, pasando de 130 días a 230 días de operación, y reduciendo el tiempo de su reparación.

Por todo ello, es señalado por Diego Mauricio Osorio Azate (2017) que esta tecnología está recibiendo una creciente atención como solución a los problemas superficiales por desgaste, oxidación a altas temperaturas, corrosión acuosa y regulación térmica. Su uso se ha extendido incluso para la fabricación de sensores avanzados y de materiales para los sectores biomédicos, de energía y ambiental. Esta tecnología también se ha extendido a una gran cantidad de usos emergentes, que aprovechan las ventajas, capacidades y rentabilidad de dicha tecnología para la recuperación de piezas deterioradas. Todo esto es claramente observable en la figura 2.23.

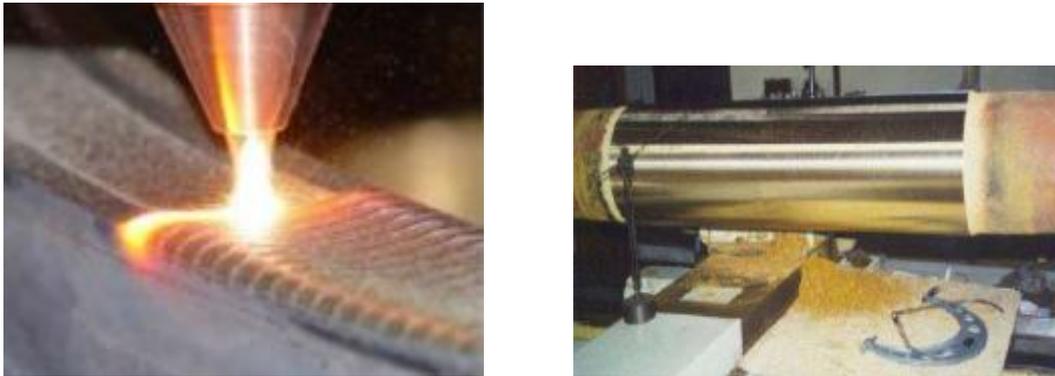


Figura 2.23. Varios ejemplos de recuperación de piezas por proyección térmica. (Fuente: <https://es.slideshare.net/deibyrequenamarclo/01-proceso-recubrimientos-proyeccion-termica>)

2.4. Recuperación por metalización

Este método consiste en el revestimiento de una superficie (metálica o no) mediante un metal, modificando las propiedades de dicha superficie, gracias a la aplicación de diferentes capas superficiales de metal.

Tal y como comenta Sergabi, son muy habituales los recubrimientos de zinc, aluminio y / o acero inoxidable cuando el elemento base es un metal, aunque el material de recubrimiento podría ser no metálico. El revestimiento es proyectado en forma de partículas, fundidas o semifundidas, sobre la superficie de la pieza formando un depósito, ver figura 2.24. La velocidad de proyección dependerá del equipo usado, siendo la responsable de la incrustación y la adherencia de las partículas al sustrato, conformando un recubrimiento denso, fuertemente adherido y con una dureza mayor a la del sustrato.



Figura 2.24. Proyección de partículas en la recuperación por metalización. (Fuente: <https://flextec.com.co/project/metalizacion-de-tambor/>)

Este método permite la recuperación de piezas vitales que hayan sufrido una avería o se hayan desgastado por el uso o por el medio que las rodea, ver figura 2.25, llegando incluso a superar los estándares originales.

El proceso consiste en el calentamiento del material de aporte (polvo o de alambre), hasta un estado fusión o semifusión, para ser transportado mediante una corriente de gas o aire comprimido hasta su deposición, creando así una superficie sobre el sustrato.



Figura 2.25. Recuperación por metalización de tambor central. (Fuente: <https://flextec.com.co/project/metalizacion-de-tambor/>)

- a) Tambor dañado.
- b) Tambor reparado.

Aunque existen diversas técnicas de metalización, se muestran a continuación las más modernas y recientes, pues es un campo donde se está produciendo un gran desarrollo.

- Metalización por alto vacío.

Según aparece en monografías, el método consiste en el calentamiento del metal a depositar (mediante resistencia, haz de electrones o plasma) hasta una temperatura próxima a su punto de ebullición, en el interior de una cámara de vacío, permitiendo la condensación del vapor metálico sobre la superficie del sustrato, como se muestra en el esquema de la figura 2.26. Las piezas estarán girando, garantizándose la obtención de una capa uniformemente distribuida. Metalizadosgines (2014) refleja la necesidad de aplicar tratamientos de limpieza y preparación de la pieza, garantizando la correcta adherencia del metal y su buen acabado final.

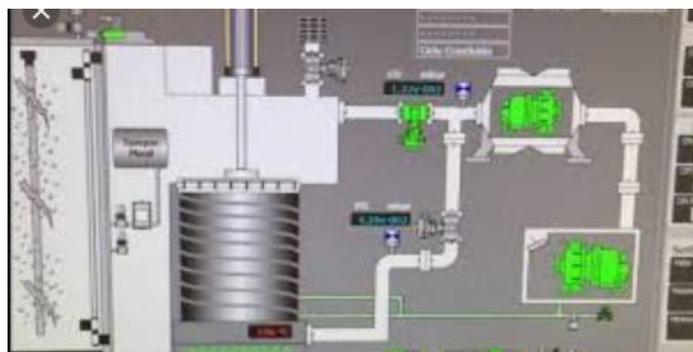


Figura 2.26. Metalización por alto vacío. (Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=HIP-kl4MvTU>)

Henri Holger Gualán Jiménez y Richard Santiago Venegas Tonato (2006) muestran como este método permite la deposición de aluminio, cobre, plata, oro y otros compuestos, tanto sobre superficies plásticas como metálicas, con el estricto requisito de que todas las sustancias a

vaporizar sean lo más puras posibles, ya que la presencia de impurezas pueden llevar a resultados inesperados, como modificaciones en el color o la pérdida de adherencia.

Las aleaciones no son apropiadas para la vaporización debido a que cada componente tiene puntos de ebullición diferentes, impidiendo que se vaporicen al mismo tiempo.

Gracias a la realización en el interior de una cámara de alto vacío se evitan los problemas de oxidación que aparecen cuando se realizan al aire libre.

- Metalización por ARC SPRAY.

Tal y como muestran Luis Felipe Borja Murgueitio y Rubén Patricio Enríquez Yépez (2014) en su publicación, este método consiste en la fundición de dos alambres metálicos mediante un arco eléctrico para ser posteriormente atomizado con la ayuda de aire comprimido, proyectándose como una capa densa, tal y como se muestra en el esquema de la figura 2.27. Obteniéndose la recuperación de la pieza, una buena protección contra la corrosión y resistencia al desgaste y la mejora de la conductividad eléctrica y térmica (en función del material proyectado).

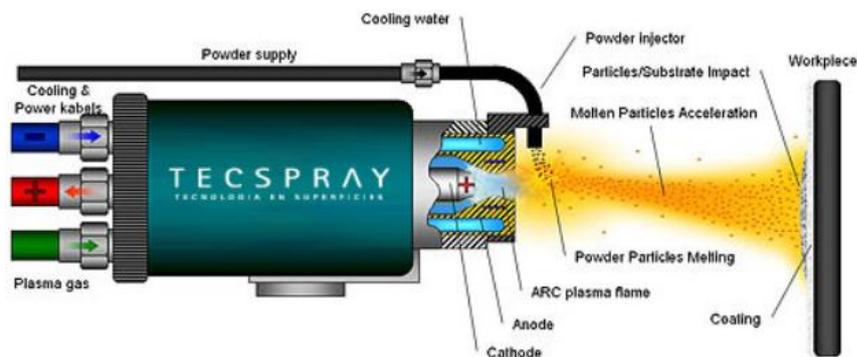


Figura 2.27. Metalización por ARC SPRAY. (Fuente: <http://www.tecspay.com.ar/plasma-arco-transferido.html>)

- Metalización por flama.

El material de aporte es fundido por gases de combustión y mediante el accionamiento del dispensador o gatillo se permite la entrada del material al flujo de gas, siendo expulsado a alta velocidad y temperatura, como muestra el esquema de la figura 2.28. Generalmente se usa acetileno con oxígeno, aunque existen variantes como la metalización por combustión a alta velocidad, por flama con polvo, flama con alambre o flama con pistola.

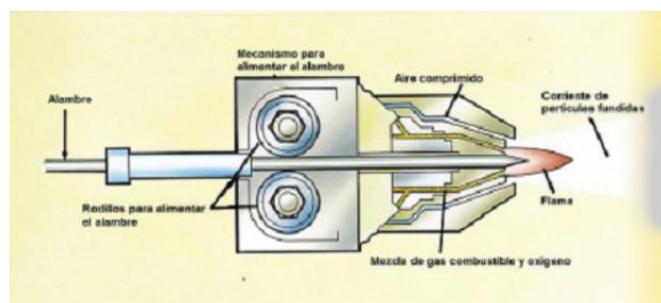


Figura 2.28. Metalización por flama. (Fuente: <https://www.cab-mex.com.mx/metalizando-por-pistola-de-gas/>)

- Metalización por plasma.

Se trata de un proceso de gran versatilidad debido a la posibilidad de fundir cualquier metal, haciendo que su uso esté muy extendido y automatizado en la industria pesada, como muestra la figura 2.29.

Como indican Luis Felipe Borja Murgueitio y Rubén Patricio Enríquez Yépez (2014), es posible la recuperación de cigüeñales de motores diesel por metalización. Otro ejemplo, lo muestra Javier Alejandro Miranda Coronel (2018) al conseguir la recuperación de las paredes erosionadas de los conductos de escape de cabezotes de motores de generación a crudo Wärtsilä V1832LN. Además de lograr la recuperación de una flecha desgastada, como aparece en la figura 2.30.



Figura 2.29. Metalización por plasma de junta rotativa. (Fuente: <http://www.metaliza.com.ar/>)



Figura 2.30. Recuperación por metalización de flecha desgastada. (Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=kNuQG1jvNvI>)

- a) Flecha dañada
- b) Flecha recuperada

Finalmente, Aimplas (2015) indica que uno de los materiales más utilizados como base son los plásticos, siendo necesaria la activación de su superficie mediante el uso de soluciones de ácido (ácido crómico carcinogénico y coloides tóxicos del Pd y Sn). Encontrándose sujeto a restricciones y desventajas como consecuencia de los problemas medio ambientales y para la salud y seguridad de las personas que conlleva.

Gracias a la investigación de alternativas a las técnicas tradicionales, se ha descubierto una nueva tecnología basada en el auto – ensamblaje molecular (SAM), lo que ha permitido crear una capa conductora por metalización a coste competitivo.

2.5. Recuperación de piezas por métodos galvánicos

Como muestran Heriberto Ches Viera y Juan Bermúdez Torres (1993) en su publicación, se pueden aplicar capas de diversas propiedades con espesores de 0,001 mm a 1,0 mm, y un amplio rango de durezas, todo esto gracias a la posibilidad de electrodepositar prácticamente todos los metales y sus aleaciones. Los métodos básicos de esta técnica son el cromado, la deposición de hierro electrolítico (acerado), el niquelado químico y electroquímico y las aleaciones Pb – Sn.

Esta técnica se lleva a cabo gracias a la facilidad de para producir reacciones químicas en electrodos conectados a una corriente eléctrica sumergidos en una solución electrolítica, que pueden ser vistas en la figura 2.31. Se pueden aplicar recubrimientos de diversos metales y sus aleaciones, como Cu, Cr, Ni, Fe, Zn, Cd, Pb – Sn, Fe – Ni, Ni – Co, etc.



Figura 2.31. Cubetas del método galvánico. (Fuente: <https://www.metrohm.com/es-mx/industrias/surface-finishing/surface-finishing-bath-composition-main-components/>)

En la industria son usados como parte de la fabricación de piezas, agregados, equipos, maquinarias, etc. Esto permitir asegurar su vida útil, además de brindar a las superficies de propiedades como: resistencia a la corrosión y al desgaste, aumento de la dureza y conductividad eléctrica, soldabilidad, termorresistencia, etc.

En la recuperación aplicada en las superficies desgastadas por fricción se logra recuperar los desgastes de hasta 1 mm de espesor. Además tiene una serie de ventajas añadidas:

- Permite la recuperación sin afectar a su estructura, evitando las deformaciones y sus correspondientes tensiones internas debidas a la aplicación de altas temperaturas.
- Permite una precisión de centésimas y milésimas de milímetro en los espesores de las diferentes capas aplicadas evitando desperdiciar material.
- Fuerte adherencia al sustrato gracias a la interrelación entre las redes cristalinas del metal – base y el electrodepositado.
- Facilidad para hacerlo masivo usando pocos recursos, ya que una vez establecida las tecnologías los resultados no van a depender de las habilidades del operario.

Por el contrario, no es recomendable ni económicamente ni técnicamente la aplicación de grandes espesores. Al igual, que tampoco resulta viable la aplicación de recubrimientos sobre superficies desgastadas por abrasión o impacto.

Aunque las grandes dimensiones de las piezas puedan considerarse una limitación, se obtienen resultados excelentes en la recuperación de estas, ya que realiza mediante la aplicación de recubrimientos locales.

Para preparar la superficie a recubrir se deben desarrollar las siguientes etapas:

- Preparación mecánica.

En esta se eliminan los defectos superficiales en la zona desgastada, aun cuando se consideren permisibles y siempre que no afecten a la calidad del recubrimiento la presencia de trazos, arañazos, pequeños poros aislados y abolladuras.

- Eliminación de tensiones.

Consiste en la aplicación de un tratamiento térmico para eliminar la existencia de tensiones, ya que puede producir agrietamiento, exfoliación y aparición de otros defectos en las capas a aplicar.

- Preparación química.

En esta última etapa, se lleva a cabo una limpieza profunda de la superficie, por lo que en función del grado de preparación, se garantizará la calidad de la capa electrodepositada, su adherencia, porosidad, uniformidad, etc., con el objetivo de dejarla completamente desengrasada y libre de óxidos, cascarilla de la laminación, herrumbre, etc. Estos procedimientos son denominados como decapado y activación.

La restauración solo se aplica en las zonas desgastadas, teniendo que proteger el resto de la superficie con una película aislante. Estos recubrimientos aislantes son polímeros seleccionados según el trabajo a realizar. Aun siendo muchos los recubrimientos que se pueden aplicar con este método, a continuación se exponen los más utilizados.

- Niquelado.

Se emplea el niquelado “duro” en la recuperación, pues refuerza las superficies sometidas a periodos intensos de fricción y permite la deposición compacta de las capas de Ni, aportando mayor dureza. Se puede aumentar la dureza de los depósitos con la adición de elementos como P, logrando aleaciones con mejores propiedades. También se emplean recubrimientos compuestos con partículas sólidas en suspensión (carburos, nitruros, grafito, diamante, caolín, granate, etc.), aumentando la dureza y resistencia al desgaste. En la figura 2.32 se muestra la realización de este proceso.



Figura 2.32. Proceso de niquelado. (Fuente:

https://www.enerxia.net/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=518:materiales-proceso-de-niquelado&catid=61&Itemid=142)

Se puede aplicar un tratamiento térmico aumentando la dureza de las capas de Ni y desgaseando el recubrimiento, evitando la fragilización por H y la aparición de fracturas. Por lo que se pueden recuperar piezas de acero u otros materiales logrando efectos similares de dureza y propiedades antifricción a las del cromado.

Gracias al coeficiente de dilatación lineal similar al del acero, se pueden recuperar piezas que trabajen a temperaturas extremadamente altas o bajas, sin peligro de separación del recubrimiento.

Este método toma especial relevancia en la recuperación de piezas de la industria alimenticia y farmacéutica, debido a las exigencias antisépticas requeridas y sus complejas configuraciones.

- Cromado.

Posee una buena adherencia en aceros, al Ni y Cu y sus aleaciones, gracias a su bajo coeficiente de fricción contra la mayoría de metales, altas propiedades anticorrosivas y la posibilidad de obtener un acabado superficial especular. La selección del electrólito será función de las propiedades requeridas en el recubrimiento.

Esta técnica presenta un gran número de particularidades destacando el elevado consumo eléctrico que limita la obtención de grandes espesores. Otra de sus peculiaridades es el poder de distribución del metal y la corriente, obligando a la creación de dispositivos que logren una mayor uniformidad de las capas depositadas, lo cual obliga al ánodo a copiar la configuración de la pieza.

En la recuperación se emplea el cromado duro cuando se requiere la aplicación de capas de 0,1 mm a 0,5 mm de espesor, como se puede ver en la figura 2.33. No se recomiendan utilizar espesores mayores debido a la alta probabilidad de provocar fracturas en los depósitos y a los elevadísimos costes.



Figura 2.33. Proceso de cromado (Fuente:

<https://i.pinimg.com/originals/67/07/4c/67074c10faf2ddca3114d21b66678e50.jpg>)

Las superficies restauradas poseen propiedades como alta dureza, resistencia al desgaste, bajo coeficiente de fricción, etc., lo cual logra la recuperación y prolongación de su vida útil.

Para piezas que trabajan en condiciones de explotación muy severas, se recomienda la aplicación de los métodos multicapas, consistentes en la deposición de una capa de cromado “lechoso” como sustrato de la capa de cromo duro. El cromado “lechoso” es depositado en forma de capas compactas sin poros, brindando a la pieza una protección anticorrosiva adicional.

- Acerado.

Este método se caracteriza por una mayor velocidad de deposición, un menor consumo eléctrico y el bajo coste de las soluciones de trabajo. Permite obtener niveles de dureza de 30 a 55 HRc y una resistencia al desgaste aceptable, superando al cromado. Se aplica en frío o caliente, aunque es preferible desde una perspectiva técnica – económica su aplicación en frío. Estos pueden ser cromados o sometidos a diversos tratamientos posteriores mejorando sus propiedades.

Como se ha mencionado, las piezas excesivamente grandes presentan limitaciones para la restauración. Para estas particularidades del proceso se han creado sistemas que aplican satisfactoriamente los recubrimientos galvánicos en zonas desgastadas.

Otro método más particular y con una amplia difusión entre escultores y restauradores es el Brushplating o electroplatinado, que permite proteger y recuperar piezas metálicas de grandes dimensiones sin necesidad de desmontarlas o trasladarlas, como aparece en la recuperación llevada a cabo en la figura 2.34. Este consiste en conectar la pieza al polo negativo de la fuente de corriente y la brocha, formada por una barra de grafito recubierta con un material absorbente para retener el electrólito y se conecta al polo positivo realizando la función de ánodo, como se ve en la figura 2.35. El electrólito se repone durante todo el proceso gracias a un sistema de goteo o mediante la aplicación de un pequeño chorro sobre el material absorbente.



Figura 2.34. Reparación mediante brushplating. (Fuente: http://www.titansisak.hr/En_BrushPlating.html)



Figura 2.35. Proceso de brushplating o electroplatinado. (Fuente: http://www.titansisak.hr/En_BrushPlating.html)

Los métodos galvánicos no finalizan con la electrodeposición. Ya que durante estos procesos y de forma simultánea a la deposición, se produce el desprendimiento de H_2 que se queda atrapado en el recubrimiento. Este es el causante de la aparición de la “fragilización por hidrógeno” y del desprendimiento del recubrimiento que llega a la rotura de la pieza. Por lo que es necesaria la aplicación de un tratamiento térmico posterior, que consiga la eliminación de la máxima cantidad de H_2 atrapado.

2.6. Recuperación de piezas por deformación plástica

Jesús León Cruz (1993) señala que la deformación plástica residual aparece como consecuencia de someter una pieza a una tensión superior a su límite de fluencia, impidiendo la recuperación de su forma anterior en estructura y propiedades. La deformación plástica en los cristales se produce por el deslizamiento de las distintas partes como consecuencia de las tensiones tangenciales, y debido al maclaje, se produce la reorientación de una parte del cristal a una posición simétrica a la primera, respecto al plano de maclaje. Estos casos son mostrados en la figura 2.36.

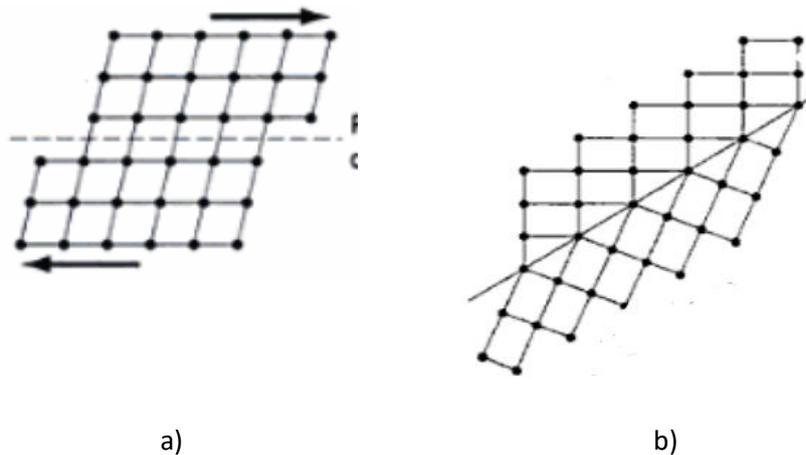


Figura 2.36. Deformación plástica en los cristales. (Fuente: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cml/5-Deformacion.pdf>)

- a) Deslizamiento.
- b) Maclaje.

Estas deformaciones son visibles, por variaciones de la forma y dimensiones del cuerpo o de parte de él. La capacidad de deformación plástica depende del estado tensional sometido, la temperatura y la velocidad de deformación. Siendo conocidos estos valores se puede aplicar una deformación plástica consiguiendo su recuperación, además de una operación posterior de mecanizado garantizando el acabado deseado, como en el ejemplo de la figura 2.37.



Figura 2.37. Recuperación por deformación plástica de puntales. (Figura: <http://www.cadenadesuministro.es/noticias/ros-spain-certifica-su-sistema-de-reparacion-de-estanterias/>)

- a) Puntales dañados.
- b) Puntales recuperados.

Además de la eliminación de defectos de forma como abolladuras, ondulaciones, torsiones, etc. se puede recuperar las dimensiones de ajuste de las superficies desgastadas. Esto eleva la resistencia mecánica de los elementos mecanizados, por endurecimiento del material y disminución de la rugosidad superficial.

El método se fundamenta en la exigencia local de redistribución del metal de la propia pieza, sin necesidad de aportar material. Las magnitudes de las cargas aplicadas dependen de la estructura del metal, determinada por la composición química y por el tratamiento térmico al que haya sido sometida.

Para facilitar la deformación plástica se puede someter a un calentamiento previo esto disminuye significativamente la magnitud de la carga requerida, aunque durante el calentamiento se va a producir

la modificación de la estructura y propiedades mecánicas, por lo que es necesaria la aplicación de un tratamiento térmico o termoquímico posterior.

Las operaciones que se pueden realizar con este método son:

- En el enderezado es empleado en la eliminación de deformaciones residuales de tipo flexible, torsionales, alabeos, etc. La dirección de aplicación de las fuerzas exteriores y momentos, coinciden con la dirección de la deformación de la pieza, como aparece en la figura 2.38. El enderezado en frío puede dar problemas, debido a la aparición de tensiones internas, este desaparece al aplicar un enderezado en caliente, pues al calentar las partes deformadas aparecen tensiones de tracción que provocan el enderezado. La aplicación de la carga se realiza con la ayuda de martillos neumáticos de mano.



Figura 2.38. Enderezado de eje. (Figura: <http://prensadosespeciales.com/enderezado-de-ejes/>)

- El recalado permite elevar la precisión de pasadores y bujes de metales no ferrosos. Durante la operación se reduce la longitud de las piezas hasta en un 15 %, aunque las piezas de responsabilidad no se deben de reducir más de un 4 % u 8 %. La dirección de la fuerza exterior es perpendicular a la dirección de la deformación, ver a continuación figura 2.39.

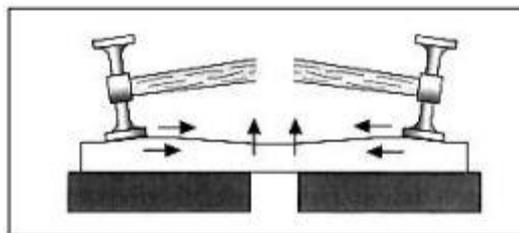


Figura 2.39. Proceso de recalado. (Fuente: <https://www.pruebaderuta.com/repuracion-piezas-metalicas.php>)

- La compresión es un proceso diseñado para la recuperación de cilindros huecos desgastados en su interior, donde las fuerzas normales de compresión están orientadas perpendicularmente al eje de la pieza. Se ha generalizado su uso para la recuperación de piezas de aceros blandos, aluminio y bronce, además de en la recuperación de camisas de hierro fundido, como es observado en el ejemplo de la figura 2.40 de la siguiente página.

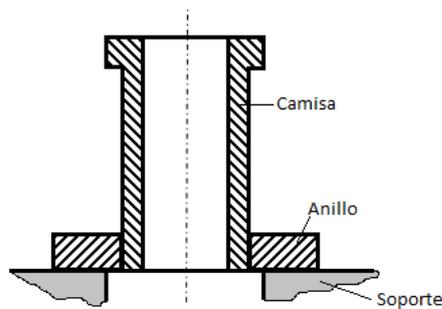


Figura 2.40. Recuperación de camisas por compresión. (Fuente: Manual de recuperación de piezas)

- La expansión es usada para la recuperación de cilindros huecos desgastados en su zona exterior, donde las fuerzas normales están orientadas perpendicularmente al eje de la pieza, ver figura 2.41. Esta técnica ha sido creada para la recuperación de piezas de aceros, aluminio y bronce.

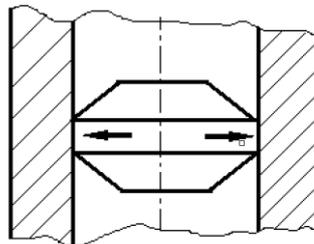


Figura 2.41. Proceso de expansión. (Fuente: Manual de recuperación de piezas)

- El cilindrado, rodillado o asentado de superficies es usado para garantizar un acabado superficial de alta calidad, aumentando la resistencia al desgaste y fatiga. También garantiza la resistencia y uniformidad en los trabajos con ajustes móviles. Por otro lado permite la recuperación de superficies exteriores de vástagos e interiores de cilindros huecos, que es lo mostrado en la figura 2.42. La calidad superficial resultante depende del régimen de deformación (esfuerzo sobre rodillo, avance, velocidad, cantidad de pasadas y calidad del material lubricante).



Figura 2.42. Proceso de cilindrado. (Fuente: <http://www.solintal.es/es/mecanizado>)

- El moleteado está basado en la compactación exterior de la superficie desgasta con una moleta, permitiendo la creación de crestas capaces de hacer crecer la dimensión de la superficie moleteada, mostradas en la figura 2.43. Suele usarse en la recuperación de piezas a las que no se les ha realizado ningún tratamiento térmico. Destaca el aumento de la resistencia a fatiga, aunque la resistencia al desgaste permanece aproximadamente igual.



Figura 2.43. Moleteado. (Fuente: <https://listado.mercadolibre.com.mx/rodillo-moleteado>)

- La penetración permite aumentar las dimensiones exteriores mediante la deformación de una sección limitada de la pieza, por lo que se recuperan así las superficies de trabajo de los ejes estriados. Las estrías son penetradas en sentido longitudinal por la introducción del instrumento en el metal, ver figura 2.44.

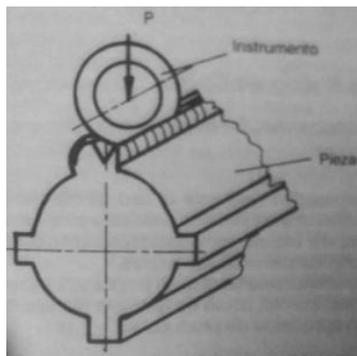


Figura 2.44. Proceso de penetración. (Fuente: Manual de recuperación de piezas)

2.7. Recuperación de piezas por deformación térmica

Según Esney Concepción Concepción (2016), es un método basado en la deformación plástica pero realizado bajo una acción térmica, como se muestra en el ejemplo de la figura 2.45. Incluye la defectación, deformación térmica, temple y tratamiento de la superficie interna, así como la restauración de la superficie de asentamiento y su prueba y control. Requiere el calentamiento de la pieza hasta elevadas temperaturas (alcanzándose los 840 – 880 °C) mediante una corriente de alta frecuencia, aunque dependerá de la temperatura máxima de la pieza, forma del campo de temperatura, propiedades físico – mecánicas del metal, intensidad del enfriamiento y dimensiones geométricas. Uno los problemas de este método, aparece en el caso de buscar la recuperación de camisas de cilindros, no siendo posible cuando el desgaste dimensional sobrepase los 0,5 mm.



Figura 2.45. Recuperación de abolladura por deformación térmica.

(Fuente: <https://revistacentrozaragoza.com/reparar-piezas-plastico/>)

2.8. Recuperación de piezas mediante resinas y pegamentos

Tal y como señala Silvia Rodríguez Colina (1993) estos métodos no requieren de un equipamiento específico ni de instalaciones complejas o locales con condiciones especiales, convirtiéndolas en una de las técnicas más utilizadas. Por otro lado según José Luddey Marulanda (2007), las resinas aportan un revestimiento duro que consiguen una buena recuperación, ver figura 2.46.



Figura 2.46. Reparación con Belzona de eje dañado. (Fuente:

<https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/102204-Reparacion-de-ejes-con-Belzona-una-alternativa-probada-a-la-soldadura.html>)

- a) Eje dañado.
- b) Eje reparado.

Una de las propiedades más importantes de las resinas es su adherencia al sustrato, además de proporcionar otras propiedades, como resistencia al impacto, abrasión y corrosión, entre otras. Para lograr un buen revestimiento, será necesario el anclaje correcto del polímero a la superficie, siendo necesario someter la superficie a un granallado o arenado específico, lo que producirá una textura y aumentará la superficie de contacto real.

Su utilización presenta ciertas limitaciones marcadas por la presión, temperatura y composición del medio, donde se va a recuperar. Ningún revestimiento puede operar correctamente si está mal aplicado, pues la experiencia ha demostrado que el 90 % de las fallas se debe a una mala recuperación, mientras el 10 % restante a una mala selección del revestimiento (está sometido a un medio para el que no fue diseñado).

La rigidez del sólido depende de la densidad de entrecruzamientos de las cadenas del polímero; a mayor densidad de entrecruzamientos, mayor rigidez, dureza y resistencia química. Teniéndose en cuenta que a mayor dureza y rigidez, aparecerá una mayor fragilidad y menor tenacidad.

Comparándose con otros procesos, como la soldadura (también aporta un revestimiento duro), las resinas presentan diversas ventajas, como ausencia de distorsión y de zonas térmicamente afectadas, oxidación y tensiones residuales reducidas, además de permitir la recuperación en tiempos cortos.

Las resinas utilizadas en la recuperación son compuestos macromoleculares de origen orgánico, y cuyas propiedades están determinadas por su composición y estructura (Silvia Rodríguez Colina, 1993). Según la forma de obtención de las resinas, estas pueden ser:

- Las resinas de condensación, que son obtenidas de la reacción química de policondensación. Las más conocidas son las fenolaldehídicas, las amínicas y el poliéster.

- Las resinas de polimerización son obtenidas por la unión de un gran número de moléculas con enlaces dobles. Las más conocidas son el polietileno, policloruro de vinilo o PVC, poliestireno, etc.
- Las resinas de adición son obtenidas al adicionar determinadas sustancias a polímeros reticulables, formando una red tridimensional sin desprendimiento de volátiles, lo que da lugar a:
 - Resinas termoestables. Caracterizadas por su capacidad de pasar durante el calentamiento a un estado no fusible o insoluble, siendo químicamente inertes en dicho estado. Sus moléculas se unen tanto por las fuerzas intermoleculares, como por fuertes uniones químicas.
 - Resinas termoplásticas. Se funden al aumentar la temperatura, recuperado el estado sólido al enfriarse. Son solubles en solventes comunes y nunca se endurecen cuando son sometidas a elevadas temperaturas. Se dividen a su vez, en resinas de fraguado en frío y de fraguado en caliente. Dentro de este último grupo, se encuentran las resinas del tipo fenólicas, amínicas, poliéster, epóxida, etc.

Todas estas resinas pueden presentarse de forma líquida, pastosa o sólida (polvos o preformas). Otra clasificación de gran interés es la realizada según la función tecnológica que desempeñan, encontrándose los siguientes casos:

- Pegamento o adhesivo.

Usadas para conseguir uniones inseparables entre diferentes materiales y con una resistencia definida, gracias a la búsqueda de la distribución más uniformemente posible de las tensiones en la capa de pegamento, como en el caso de la figura 2.47. Consigue elevar los valores de la resistencia a compresión y cizallado, además de permitir sustituir las uniones de remaches y tornillos, eliminando los orificios que estas requieren. Esto consigue una mayor resistencia a la corrosión, una distribución más uniforme de las tensiones y una mayor resistencia estática y a fatiga. Aunque suelen tener una baja estabilidad térmica. Las características a considerar cuando se seleccione el tipo de resinas son la baja viscosidad, la alta adherencia y la buena resistencia a las cargas estáticas y dinámicas.

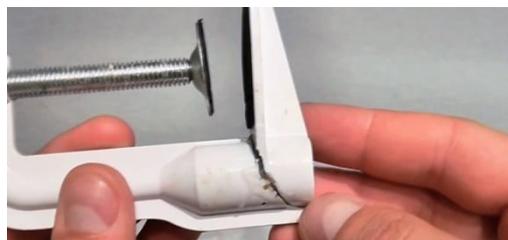


Figura 2.47. Reparación con pegamento para aluminio.

(Fuente: <https://www.pegamentoadhesivo.com/pegamento-para-aluminio/>)

- Regeneración de partes perdidas.

Reconstrucción geométrica de zonas, que debido a un impacto o a su mala operación, han perdido un trozo o han sido perforadas, ver ejemplo de la figura 2.48. También es posible recuperar piezas con defectos de fundición y errores de maquinado. Será muy habitual el uso de resinas combinadas con polvos de relleno y materiales de refuerzo, permitiendo devolver las características dimensionales y propiedades de trabajo. Los materiales de relleno logran mejorar las propiedades fisicomecánicas, dieléctricas, de fricción, antifricción, aumento de la resistencia mecánica y al calor, y la disminución de las contracciones. Se seleccionará la resina buscando garantizar una alta

resistencia a los esfuerzos de tracción y compresión, alta densidad, alta adherencia y que los sobrantes sean fácilmente retirados mediante mecanizado.



Figura 2.48. Regeneración de partes perdidas mediante loctite. (Fuente: <https://www.motorok.com/noticias/soldadura-en-frio-loctite/>)

- Sellaje.

Consiste en el hermetizado de poros, grietas y picaduras en la superficie de depósitos, tuberías, cuerpos y conductos donde circula un fluido, como se puede ver en la figura 2.49. Requieren el uso de una resina con baja viscosidad, garantizando la penetración en toda la superficie porosa o agrietada. Puede acompañarse con algún material de relleno o refuerzo, logrando la resistencia mecánica necesaria. Hay ocasiones donde la pieza a recuperar está produciendo fuga y no es posible su extracción, por lo que existen resinas de emergencia o fraguado rápido que permiten el hermetizado o sellado del defecto en un breve espacio de tiempo. Aunque su duración no es demasiada, siendo necesario extraerla para llevar a cabo la recuperación.

Las resinas forzadoras de juntas tienen la propiedad de adaptarse perfectamente al perfil irregular, por lo que forman una capa que garantiza su funcionamiento hermético. Dentro de sus propiedades, deben cumplir los requisitos específicos para que sean capaces de detener o contrarrestar los microprocesos causantes del deterioro específico.



Figura 2.49. Resina de sellaje. (Fuente: <https://www.motorok.com/tribunas/loctite-tambien-ofrece-soluciones-para-las-dos-ruedas/>)

- Reconstrucción y protección antidesgaste.

La preparación superficial dependerá de la zona a proteger o reconstruir, buscando la eliminación de las causas del deterioro, ver figura 2.50. Los casos donde se presenten grietas en la superficie, deberán ser eliminados con un bisel u otro procedimiento garantizando la retirada de toda la capa deformada plásticamente. Así se evita a la vez, que la superficie sobre la que se deposita la resina

esté completamente lisa, pues una rugosidad adecuada garantiza una mejor adherencia. Las resinas no se aplican directamente, siendo necesaria la realización de una mezcla previa, que está formada por una resina base, endurecedores, rellenos, plastificadores y catalizadores. El fraguado dependerá de esta mezcla y sus proporciones, aunque de forma general este proceso se acorta cuando aumenta la temperatura y, por el contrario, se alarga cuando disminuye la temperatura. Por lo tanto, no solo se ve afectado por la temperatura, sino que se ve afectado también por la humedad.



Figura 2.50. Aplicación de resinas de reconstrucción y antidesgaste.

(Fuente: http://www.sintemar.com/sites/default/files/ca_sintemar_es_resinas_epoxi_y_uretanos_devcon_1.pdf)

Además de todas las técnicas vistas es un método en continua investigación, por lo que se suelen descubrir nuevas resinas y pegamentos que permitan mejores recuperaciones a costes menores. Un ejemplo de esto, según Andrés Gómez Estévez (2006), es la obtención de diversos productos a partir de la industria azucarera para el mantenimiento y recuperación de piezas. Aunque las composiciones poliméricas de mayor uso están basadas en resinas epoxídicas, fenólicas, poliéster, alquídicas, gomas sintéticas y naturales, es posible el empleo de resinas poliméricas furánicas. Las composiciones furánicas desarrolladas por el ICIDCA (Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar) para la recuperación se basan en resinas furano – epoxídicas sintetizadas para satisfacer los requerimientos de la matriz, llamándolas resinas FAM. Estas composiciones poliméricas destinadas a labores de reacondicionamiento elaboradas mediante resinas FAM pertenecen a la línea de productos FURAL, que están encaminados a la recuperación de piezas.

Las resinas pueden usarse sobre piezas recuperadas con resinas, u otras técnicas, como capa protectora final, ya que la técnica empleada para su aplicación es la pulverización a la llama, en esta se usan resinas en polvo y como medio de proyección un soplete de llama oxiacetilénica (Silvia Rodríguez Colina, 1993). Se suele aplicar para mejorar la adherencia un precalentamiento.

Por último, los recubrimientos por suspensión son aplicados con un pulverizador o atomizador, siendo necesario realizar un calentamiento previo para lograr la fusión del polímero. Una vez pulverizada la resina se enfría bruscamente en agua, como si fuese un temple, adquiriendo su elasticidad el polímero. Estos recubrimientos son utilizados como protección contra medios agresivos y aislantes eléctricos.

2.9. Aplicación de los tratamientos térmicos en la recuperación de piezas

Según Osmary Ortiz Núñez (1993), permiten variar las propiedades de una gran cantidad de materiales, mediante procesos tecnológicos donde la temperatura y el tiempo representan el papel fundamental. El objetivo es ampliar la durabilidad basándose en el conocimiento de las transformaciones estructurales.

Son empleados como tecnología de recuperación cuando las propiedades perdidas se derivan de transformaciones reversibles de la estructura, como en el caso de elementos elásticos o cuando el desgaste sufrido puede ser compensado con variaciones dimensionales producto de las transformaciones de fase. Para la recuperación de elementos elásticos, estos son sometidos durante la fabricación a un temple con un revenido medio, dentro del rango de temperaturas donde alcance el valor del límite elástico máximo.

Un ejemplo de esto sucede cuando un muelle ha sido sometido a cargas cíclicas sufriendo una transformación estructural muy lenta, hasta llegar a una estructura más estable, produciéndose la pérdida de las propiedades elásticas requeridas. Para restablecer las propiedades iniciales, será necesario someterla al mismo tratamiento térmico de su fabricación, un temple y un revenido medio, estos se pueden observar en la figura 2.51.



a)



b)

Figura 2.51. Tratamientos térmicos. (Fuente: <https://www.slideshare.net/LindaBarrera1/temple-y-revenido-72919502>)

- a) Temple.
- b) Revenido.

Otro ejemplo es la recuperación de aros de motores de combustión interna. En piezas de hierro fundido se puede emplear los tratamientos térmicos como recuperación cuando la variación dimensional ocurrida sea de tan solo unos pocos milímetros. Este tipo de aros pueden “crecer” hasta llegar a la magnitud requerida, mediante la aplicación de un revenido y un temple.

También se puede ver el caso de la recuperación de las tapetas de los puntos de apoyo de un cigüeñal y de los aros del motor de combustión interna. Como muestra en su estudio Francisco Luis Hernández Arias (2008), aprovechando las propiedades de los hierros fundidos de incrementar su volumen, se puede conseguir la recuperación de las dimensiones perdidas por desgaste en la zona de interferencia sin necesidad de aportar material y utilizando un horno de cementación gaseosa o de cámara, para evitar la descarburación de la superficie, además de someterlas a un revenido, antes de enfriarlas al aire. Si el crecimiento es mayor del permisible, las tapetas serán sometidas a un rectificado interior.

Por todo ello, aunque no es muy utilizado, los tratamientos térmicos presentan ventajas tecnológicas y económicas representativas respecto a otros métodos, siendo posible su extensión a piezas fabricadas de hierro fundido, con estructura perlítica.

2.10. Recuperación de piezas mediante recubrimientos por termodifusión o termoquímicos

Tal y como demuestra Israel Zamora Utset (1993), se obtiene la recuperación por termodifusión gracias a la saturación de la superficie del metal, que suele ser acero, con algún elemento como C, Ni, B, Si, etc. Durante el proceso, debido a la alta temperatura, estos elementos se difunden dentro del metal creando una capa superficial de una aleación del Fe con el metal en cuestión o de compuestos del Fe, el elemento saturado y algún otro componente del acero, como se ve en la figura 2.52.



Figura 2.52. Recubrimientos por termodifusión o termoquímicos (Fuente: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8426.pdf>)

Cuando se satura el acero con C o N, se producen los procesos conocidos como cementación y nitruración. Otros tratamientos muy conocidos son la saturación con B o borado, Cr o cromado por difusión, Al o alitación, Si o silicificación o Ti o titanato. Todas estas capas confieren a la superficie nuevas propiedades, como mayor dureza, resistencia al desgaste y corrosión, etc.

La cementación, la nitruración y la nitrocementación son muy usados cuando se requieren superficies duras y núcleos tenaces. Los otros recubrimientos, aunque no son tan usados, se emplean en la recuperación de piezas sometidas a un fuerte desgaste mecánico o corrosivo.

La alitación, cromado y silicificación permiten elaborar piezas de acero, donde el acero inoxidable o aleaciones de Ni no alcanzan los requerimientos necesarios. Estos son muy empleados en la recuperación de elementos mecánicos de precisión desgastados, sometidas a fricción metal – metal.

La aplicación de los recubrimientos de termodifusión se pueden realizar en fase sólida (mezclas de polvos en contenedores), fase líquida (hornos de sales) y fase gaseosa (cámaras especiales). El más desarrollado es en fase gaseosa, pues permite un mejor control de la composición de la atmósfera saturante.

Los procesos de cementación, nitruración y nitrocementación van a permitir recubrimientos de alto espesor hasta el orden de las décimas, siendo usados en los recubrimientos de piezas que soportan grandes presiones sobre una base blanda (asimila la deformación). Pero la dureza es inferior a la obtenida mediante otros recubrimientos diseñados para capas finas con gran resistencia al desgaste, a bajas presiones de contacto o sobre base dura. La nitruración es el único proceso capaz de cumplir las exigencias de ambos grupos.

A continuación se explican más detalladamente algunos de estos procesos:

- La cementación permite reproducir, en la superficie del acero, las características de un acero de alto contenido en C, alcanzando sus propiedades finales después del temple y revenido correspondientes, este proceso se puede ver en la figura 2.53. Pese a su utilidad no puede competir con otros tratamientos en lo referido a la resistencia al desgaste, ni al ataque de medios corrosivos.



Figura 2.53. Proceso de cementación. (Fuente: <https://www.templeindustrialesalcala.es/cementacion/>)

- La nitruración es efectiva en aceros con elementos formadores de nitruros en su composición, como el Al, V, Cr, etc. Está formado por varias subcapas, donde la más importante es conocida como nitruración interna, pues está formada por austenita nitrogenada con nitruros dispersos de los elementos aleantes, como se puede ver en las piezas tratadas de la figura 2.54. En los casos donde las presiones sean bajas y sólo se requiera resistencia a la abrasión, es preferible la nitruración con capas superiores de nitruros. La dureza de la capa nitrurada es muy variable debido a su dependencia con la composición del acero.
- El cromado es aplicable en todos los aceros, aunque dependiendo del contenido en C se obtendrá una aleación de Fe o una capa superior de carburos de Cr, visible en la figura 2.55. Solo en aceros de alto contenido en C estarán perfectamente delimitadas. Los aceros cromados del primer caso son empleados en medios oxidantes neutros o ácidos, por su alta resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Mientras los del segundo caso son utilizados cuando se requiere una alta resistencia al desgaste. Puede usarse el proceso de carbocromado o saturación sucesiva de un acero de bajo C, aplicándole primero una cementación y posteriormente el Cr, formando una capa bien definida de carburos.



Figura 2.54. Proceso de nitruración. (Fuente: <https://www.indiamart.com/proddetail/plasma-nitriding-service-6815152888.html>)



Figura 2.55. Proceso de cromado. (Fuente: <https://www.mecanizadossinc.com/acabado-cromado-mecanizado-piezas/>)

- El borado obtiene una capa bifásica, donde la capa superior está compuesta de FeB y la inferior de Fe₂B, estas capas se pueden ver en la figura 2.56. En otras tecnologías se obtiene una sola fase de Fe₂B, aun siendo menos duro, da mejores resultados en aplicaciones con altas presiones de contacto. El borado bifásico es superior cuando el desgaste se ha producido por abrasión pura, siendo mucho más ventajoso que el resto de recubrimientos. También es usado en moldes de conformado de metales, debido a las grandes presiones de contacto a las que son sometidas. Las propiedades dependerán de la composición del acero. En concordancia con su dureza, las capas de borado son frágiles y, al contrario que en la nitruración o el cromado, disminuyen la resistencia a fatiga, sobre todo si no se consideran las tensiones residuales presentes entre las capas y el sustrato. Las capas de borado poseen una gran estabilidad frente a incrementos de temperatura y una gran resistencia química frente a ácidos activantes.

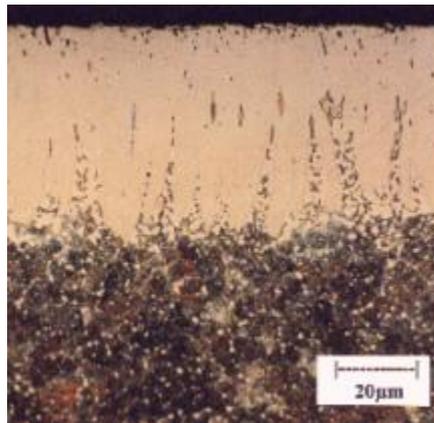


Figura 2.56. Capa de boruro en un acero aleado con 6% de Cr.

(Fuente: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/endurecimiento%20superficial%20del%20acero.pdf)

El requisito indispensable para usar los recubrimientos por termodifusión es el incremento de las dimensiones debido a su aplicación. El problema que presentan se debe a que el cambio dimensional está afectado por la interacción entre la capa termodifundida y el metal base. Se pueden identificar varios factores principales influyentes en la determinación de las dimensiones finales, estos son las variaciones dimensionales como consecuencia de los cambios estructurales por el calentamiento y enfriamiento, la estrecha interrelación entre la composición del metal base y el elemento del recubrimiento y, finalmente, las características y propiedades del tratamiento empleado.

Es decir, según el estado cristalográfico del acero (que define su volumen específico) y la velocidad de enfriamiento escogida, tendrá unas dimensiones finales mayores o menores. Aunque el cambio de dimensiones debido al cambio de estado cristalográfico puede alcanzar tal magnitud, que llegue a anular la variación dimensional causada por el recubrimiento en sí. Conociendo el cambio de volumen debido al cambio de estado, se podrá conocer el cambio de dimensiones.

Es necesario realizar un cuidadoso estudio de la composición y estructura del material, compatibilidad del recubrimiento y de éste con el material del par de fricción en contacto durante el funcionamiento, la agresividad del medio donde trabaja y un cuidadoso estudio experimental de los cambios dimensionales. Hasta encontrar las condiciones óptimas para la aplicación del recubrimiento.

2.11. Recuperación de piezas por fundición

Según Antonio Suárez Marrero (1993), la fabricación mediante fundición tiene un gran peso debido a la mejora de las aleaciones y a su coste, ya que es relativamente barato. Con el aumento del tamaño, su diseño se hace más complejo o las aleaciones son más especiales, volviéndolas más costosas.

Los métodos de recuperación por fundición son muy usados, principalmente cuando se necesita recuperar zonas voluminosas donde las técnicas como el recargue, el metalizado, el encasquillado, etc., no son convenientes. En los casos donde la aleación de aportación necesita ser muy semejante en homogeneidad, a la aleación base y cuando se necesita mejorar las características de explotación.

Algunos de los métodos usados son:

- En la recuperación de piezas por vertido de metal fundido se emplea en piezas voluminosas, oquedades o defectos grandes y simples. Es necesario preparar el defecto, esto incluye la preparación del metal y el calentamiento de la pieza. El moldeo del defecto se realiza empleando una mezcla con las propiedades requeridas, siendo necesario humedecer previamente la superficie a reparar, para posteriormente moldear el defecto y emparejarlo mediante una cuchara. El molde se secará durante el proceso de calentamiento. Este proceso se puede ver en la figura 2.57.

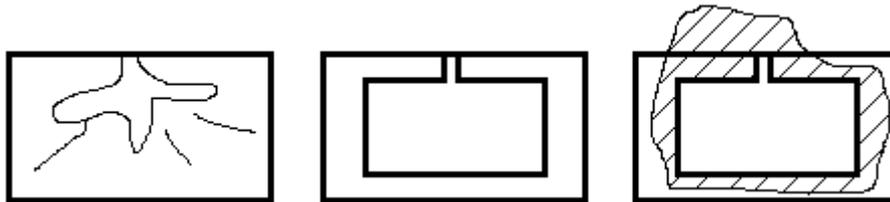


Figura 2.57. Limpieza y moldeo de grieta profunda. (Fuente: Manual de recuperación de piezas)

El enfriamiento dependerá de las dimensiones. Por lo que será preferible un enfriamiento lento, que se realiza cubriendo el defecto reparado con una mezcla de moldeo seca o mediante pedazos de carbón. Un problema que presenta es la necesidad de prever un desagüe del metal líquido, pues la superficie del fondo y de las paredes deberán fundirse por la acción térmica del metal vertido. Esto implica un gasto de metal, no inferior, a 4 ó 5 veces el volumen del defecto. Para evitar este consumo excesivo se calienta la zona a reparar mediante un arco eléctrico o llama oxiacetilénica, hasta lograr reblandecer el fondo de la zona con defecto.

- La fundición bimetálica es usada para ahorrar o reponer el metal caro. En este destaca la difusión de una aleación en otra.
- Los materiales macroheterogéneos fundidos se basan en la presencia de una superficie de matriz plástica como base de una capa de alta resistencia por la fusión de gránulos pulverizados de acero o Fe fundido. Obteniéndose una capa sin grietas, poros ni oquedades, y con una alta resistencia al desgaste.
- Los recubrimiento con metalizado por arco, son realizados mediante el calentamiento por arco del recubrimiento de fundición bimetálica.
- La fundición biometálica en moldes con recubrimientos antioxidantes permite la recuperación mediante el vertido de una aleación sobre la pieza a recuperar, obteniendo una pieza recuperada bimetálica, ver figura 2.58, y permite la obtención de piezas con mejores propiedades, disminución del consumo de acero y de las aleaciones de alta aleación (entre un 60 % a 75 %). El aumento de la productividad de los procesos de metalización entre 6 a 10 veces disminuye el coste hasta en un 30 % respecto al de una nueva.



Figura 2.58. Proceso de fundición biometálica en moldes con recubrimientos antioxidantes.

(Fuente: <http://profabricacionmariana.blogspot.com/2011/10/fundicion-y-colado-al-alto-vacio.html>)

Esta técnica se basa en la unión por difusión de la aleación vertida con el material de la pieza base, previamente calentado bajo una capa de recubrimientos sintéticos de baja permeabilidad a la entrada de O. Según la configuración de la pieza y el espesor de la capa biometálica, se prevé el empleo de moldes de arena, coquillas u otros, garantizando el control de los parámetros del proceso de calentamiento del metal base, vertido de la aleación y cristalización de la aleación biometálica.

Según Alexis Roberto Guevara Leiva (2016), una de las piezas recuperables mediante este tipo de fundiciones son los cojinetes de fricción del árbol de levas del motor YUCHAI, mostrados en la figura 2.59. Se tratan de piezas biometálicas a las que solo es necesario reponerle la capa de trabajo, pues esta es la desgastada.



Figura 2.59. Cojinete de fricción del árbol de levas del motor YUCHAI. (Fuente:

<http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7088/Guevara%20Leiva%20Alexis%20Roberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

Para su recuperación, se realiza un revestimiento mediante babbitt (una de las aleaciones más utilizadas en la superficie de apoyo de los cojinetes de fricción) con la ayuda de diferentes métodos:

- Revestimiento en moldes. Método más simple, basta con tomar un molde donde se introduce el casquillo, se coloca el mandril y se vierte el babbitt. El revestimiento resultante no es de muy alta calidad, pues no se alcanza la presión necesaria sobre el babbitt.
- Revestimiento en fundición centrífuga. Los casquillos son colocados en un accesorio giratorio. Al alcanzar una velocidad determinada de giro, se hace el vaciado del babbitt líquido. Obteniéndose fundiciones de muy buena calidad, siendo el método más recomendado en las plantas de reparación de automóviles.
- Revestimiento por inyección. Se coloca el casquillo en un molde especial, donde se inyecta el babbitt a una presión determinada. Obteniéndose cojinetes de muy buena calidad, pero con la dificultad para mantener la hermeticidad entre el molde y el casquillo, produciéndose pérdidas excesivas de babbitt.

El prensado isostático en caliente (Antonio Suárez Marrero, 1993), consiste en la compresión uniforme de las piezas con líquidos o gases especiales a determinada temperatura, presión y tiempo de mantenimiento.

Empleando “gasostatos”, consta de un contenedor de acero de alta resistencia, equipado con un calentador y unido a un sistema de alta presión mediante gas, ver figura 2.60. Estos contenedores están térmicamente aislados, colocándose verticalmente, se cargan con las piezas a rectificar, y se procede al enrarecimiento y bombeo de argón, hasta alcanzar una determinada presión, aumentando posteriormente como consecuencia del aumento de la temperatura, manteniéndolo un tiempo determinado y, finalmente, dejarlo enfriar y extraer el gas hasta alcanzar unos valores de presión normal. Permite eliminar defectos como microporosidades y microgrietas, y mejorar las propiedades.

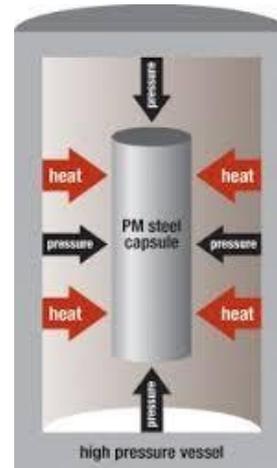


Figura 2.60. Proceso de prensado isostático en caliente. (Fuente:

<https://sites.google.com/site/procesosdefabricacion33/prensado>)

La recuperación de piezas por absorción líquida consiste en inyectar Pb o Sn líquido eliminando porosidades, a una presión de 4 atm a 5 atm durante la inyección, manteniéndolo posteriormente alrededor de unos 10 minutos. En el caso de piezas con microporos trabajando a temperaturas inferiores a los 250 °C, son recuperadas mediante absorción líquida de baquelita, esto requiere de un secado de un par de horas y de un tratamiento térmico, consiguiendo su insolubilidad.

2.12. Recuperación de piezas por encasquillado

Tal y como señala Esney Concepción Concepción (2016), este método permite lograr una superficie interior de mayor resistencia al desgaste. Consiste en la introducción, dentro de las camisas de los cilindros, mostrados en la figura 2.61, de un casquillo previamente elaborado y tratado mecánicamente.

La ventaja reside en que las camisas encasquilladas pueden recuperarse reiteradamente, tan solo con la sustitución del casquillo desgastado por uno nuevo. Asegurándose de que no haya un fin de la vida útil de las camisas de los cilindros.

Los casquillos empleados se obtienen a partir de chapas de acero, conformado hasta la obtención de un cilindro, introduciéndolos en la camisa, hasta una medida previamente determinada, mediante un prensado. La unión de los extremos de la chapa conformada, quedan comprimidos durante el montaje, lo que garantiza prácticamente su impermeabilidad tras la elaboración mecánica. Puede realizarse con láminas finas, de entre 0,6 mm a 0,8 mm de espesor, sin necesitar de ningún mecanizado posterior.



Figura 2.61. Camisa del motor YUCHAI.

(Fuente: <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7179/Concepci%C3%B3n%20Concepci%C3%B3n%20Esney.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

Según Adrián Bernal Leyva (2012), gracias a este novedoso método, se ha conseguido recuperar el desgaste producido en el árbol de una bomba centrífuga, en la zona de la empaquetadura, mediante la colocación de un casquillo. Garantizando un ajuste adecuado y comprobando su resistencia a la presión máxima provocada por la interferencia. El encasquillado del árbol no afecta a la resistencia de esa zona de la pieza. Como la tensión de trabajo es menor a la permisible, se garantiza la adecuación de la resistencia a flexión.

El montaje, aclara Esney Concepción Concepción (2016), se realiza mediante un prensado con interferencia y con sobremedida interior, para el maquinado y bruñido de terminación. Además, Adrián Bernal Leyva (2012) puntualiza la necesidad de realizar un cálculo previo de la unión garantizando dos aspectos fundamentales, que son, en primer lugar, el apriete mínimo sobre las piezas debe garantizar el no deslizamiento de estas debido a la acción del par de fricción, y, en segundo lugar, el apriete máximo admitido por el casquillo y la pieza, no pueda causar ningún tipo de fallo durante el ensamblaje.

Capítulo 3: Caso práctico: bomba centrífuga

El caso práctico a estudiar consiste en la recuperación de dos bombas centrífugas verticales con distintos grados de afección en sus elementos. Una bomba centrífuga es una máquina que transforma la potencia eléctrica, u otras, en potencia hidráulica, mostrada en la figura 3.1. En este caso, se tratan de dos bombas verticales multietapas sumergidas, cuyo motor se encuentra en el exterior.

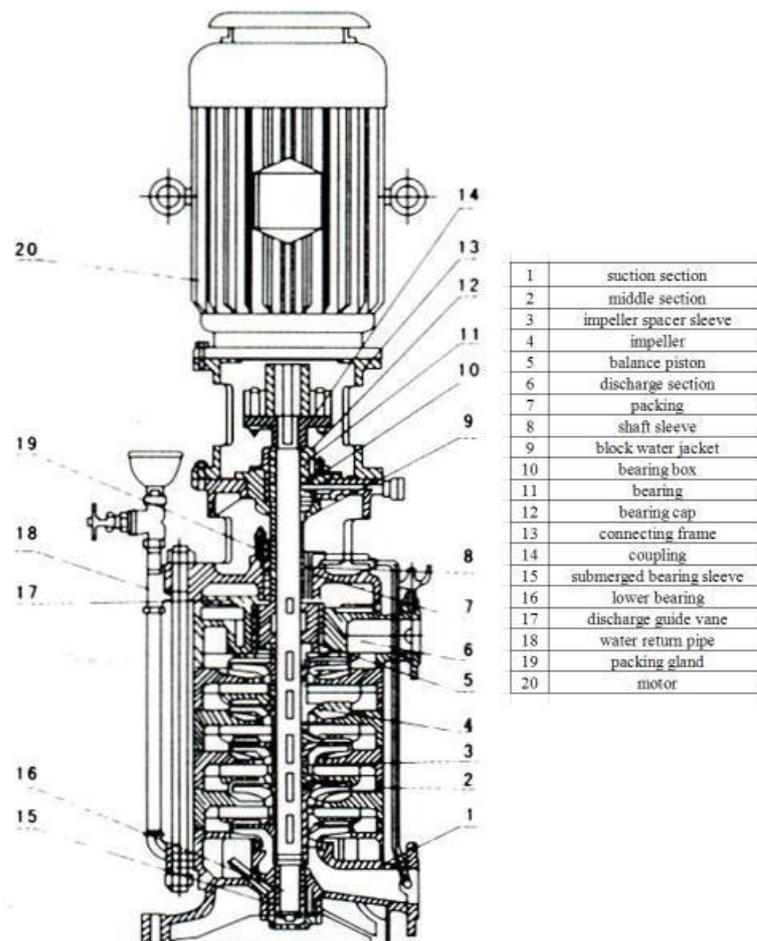


Figura 3.1. Esquema general de una bomba multietapas vertical. (Fuente: <https://m.made-in-china.com/product/High-Pressure-Vertical-Multistage-Pump-749633285.html>)

Las dos bombas estudiadas estaban trabajando desde hacía ya varias décadas con agua bruta procedente del río Guadalquivir, donde el daño principal presentado era la corrosión, no solo a causa del bombeo de agua, sino además por la presencia de una gran cantidad de incrustaciones de mejillón cebra, tanto en el interior como en el exterior de la bomba. Estos han causado una gran corrosión en las bombas, hasta provocar la pérdida de grandes secciones de metal en algunas de las piezas.

En la figura 3.2 se puede ver la mayoría de piezas de una de las bombas desmontadas en el taller de reparaciones, pudiéndose apreciar a simple vista las dimensiones de las mismas y la necesidad de su reparación, pues la corrosión presentada es evidente.



Figura 3.2. Una de las bombas desmontadas.

Las piezas exteriores que aparecen pintadas de azul en la figura 3.3, han sufrido menor corrosión por no estar en contacto directo con el medio acuoso, apareciendo exclusivamente en aquellas piezas más próximas al agua, pero en menor cantidad y en zonas más localizadas. También es observable en esta figura, el nivel de corrosión sufrido por la tubería de la bomba (cilindro situado detrás de las piezas azules).



Figura 3.3. Piezas exteriores de la bomba.

En la figura 3.4 se aprecia con gran claridad la diferencia entre el nivel de corrosión de las piezas exteriores y la de los impulsores y cuerpos de los impulsores, completamente corroídos.



Figura 3.4. Piezas exteriores e impulsores.

En las figuras de la 3.5 a la 3.8, se pueden ver los impulsores y sus cuerpos, además de otras piezas interiores. Se aprecia a simple vista, como están completamente corroídos tanto por el agua como por la presencia del mejillón cebra. Los niveles de corrosión son muy elevados, figura 3.6, por lo que se aprecia que el estado del metal está prácticamente levantado en láminas que son fácilmente rompibles con las manos.



Figura 3.5. Impulsores



Figura 3.6. Detalle de una de las piezas de un impulsor

La presencia del mejillón cebra llega a tal nivel, que aún se pueden observar alguno de estos adheridos a las piezas, figuras 3.7 y 3.8. El problema del mejillón cebra es su capacidad para adherirse a las superficies metálicas de la bomba, sin importar si están pintadas o tratadas, anidan sobre estas y forman grandes colonias pudiendo llegar a generar unos niveles de corrosión excesivos como consecuencia de su presencia y de las sustancias que segregan.



Figura 3.7. Cuerpos de los impulsores.



Figura 3.8. Cuerpos de los impulsores. Detalle del mejillón cebra.

La corrosión también ha afectado al eje según se aprecia en las figuras de la 3.10 a la 3.13. Además del problema de la corrosión, los ejes también presentan indentaciones debido al desgaste de los soportes de los rodamientos, siendo apreciable las marcas gravadas en los lugares donde iban situados cada uno de dichos elementos.



Figura 3.10. Eje y tubería.



Figura 3.11. Eje de la bomba. Detalle de las marcas sufridas.



Figura 3.12. Eje de la bomba.



Figura 3.13. Eje, tubería y otras piezas de la bomba.

Por último, en la figura 3.14 se puede ver el estado de otras piezas de la bomba, como los tornillos y las tuercas, pues ninguno de dichos elementos se han podido librar del ataque de la corrosión.



Figura 3.14. Otras piezas de la bomba.

Aunque el problema principal que presentaban estas bombas era el de la corrosión, también presentaban problemas de desgaste debido a todos sus años de funcionamiento. Sin embargo estos últimos, quedan un tanto enmascarados debido a los altos niveles de corrosión que sufren. Además de todos estos problemas, y como consecuencia de ellos, se ha podido apreciar la presencia de cavitación en algunos de los impulsores, aunque no es apreciable en las fotos.

Las reparaciones necesarias se llevaron a cabo en un taller especializado en el trabajo con bombas empleando los métodos necesarios para cumplir los siguientes objetivos deseados:

- Mejora del rendimiento de la bomba durante su funcionamiento.
- Alargar la vida útil del mayor número de piezas y elementos posible.
- Mejora de la capacidad de la bomba para hacer frente a las condiciones adversas durante su funcionamiento, buscando mejorar su resistencia al ataque del mejillón cebra.
- Rentabilidad económica de la recuperación para la empresa propietaria de las bombas.

Buscando cumplir estos objetivos, se consiguió la recuperación de un gran número de piezas de la bomba, aunque también fue necesaria la sustitución, por piezas nuevas, de otras tantas, debido a la incapacidad de ser recuperadas. Ya fuera por tratarse de piezas cuyo desgaste era excesivo, superando los niveles admisibles de recuperación, o por tratarse de piezas donde por motivos varios, resultó ser más conveniente su sustitución directa.

La empaquetadura exterior de ambas bombas fue sometida a un chorreado con el tamaño de grana necesario, para posteriormente imprimarla en una pintura especial para sus condiciones de trabajo. Pues aunque se encontraban un poco deterioradas, dicho deterioro no afectaba al funcionamiento de la bomba, por lo que era innecesaria la recuperación de esta zona. A este tipo de piezas solo se les somete a proceso de recuperación cuando el deterioro que presentan es muy excesivo. La zona de los asientos, es la única más delicada de las mismas, para garantizar que encajasen perfectamente, se les sometió a un limado, asegurando que no quedase ninguna rebaba que pudiese afectar a la unión de las mismas durante el proceso de montaje final.

Los ejes presentaban un gran desgaste, tanto por corrosión como por los arañazos producidos como consecuencia del rozamiento de los rodamientos al haberse desgastado los casquillos, pues era visible dichos arañazos en los ejes. La opción más segura es la de su sustitución, o en el caso de presentar un desgaste mínimo, pueden ser sometidos a un proceso de mecanizado. En el caso de estos ejes, el desgaste que presentaban era excesivo, por lo que se optó por la sustitución total, siendo mecanizados en el propio taller de reparaciones. Además, algunas de las partes de los ejes sufrían tal nivel de corrosión que era directamente imposible determinar de cuánto era el desgaste o desviación que presentaban ya que no podían ser ni siquiera medidos, siendo este otro de los motivos que hizo necesaria su sustitución.

Todos los casquillos empleados para conectar los rodets al eje de la bomba fueron sustituidos, debido a que se encontraban muy desgastados. Para el caso de estas bombas, los casquillos han sido proporcionados por una empresa especializada en este tipo de piezas, encargándose de la fabricación de unos casquillos especiales a partir de una especie de plástico muy duro. También fue necesaria la sustitución de los casquillos de aspiración debido a que las condiciones en las que se encontraban los hicieron insalvables.

Los impulsores fueron sometidos a una reconstrucción total, para ello se comenzó mecanizando la parte en rozamiento con el aro fijo, consiguiendo garantizar que todos los impulsores de la bomba quedasen iguales y equilibrados. En el caso de los anillos móviles, se les rebajó el diámetro, pues debido a las condiciones y el tiempo de trabajo habían sufrido problemas de arañazos y pérdida de su concentricidad. Pero, si alguno de ellos resulta imposible de recuperar, se procedería a la colocación de aros nuevos mecanizados en el taller. De esta forma, se garantizará que todos los aros de las bombas posean unas holguras que se encuentren dentro de las tolerancias. Además, en el caso de estas bombas, se les aplicó un recubrimiento especial de belzona, con el que se busca combatir el problema del ataque de los mejillones cebra.

Para el rellenado de las picaduras pequeñas se utilizó un compositex de relleno. Mientras que para el caso de las picaduras, producidas por la cavitación, se rellenó con un supermetal y posteriormente fue lijado para conseguir el acabado superficial deseado. Sin embargo, las zonas de los álabes que presentaban una considerable falta de material, como consecuencia de la cavitación, fueron rellenadas y reconstruidas mediante el uso de unas pastas especiales.

La tubería de malla, pese a la corrosión que presentaba, pudo ser reconstruida mediante soldadura con electrodo de acero inoxidable.

Sin embargo, una de las piezas sustituidas, fueron las cajas de rodamientos, ya que se sustituyen siempre para garantizar el funcionamiento suave y sin holgura.

Lo mismo sucedió con las tuercas y tornillos, los cuales habían perdido toda su resistencia debido a la corrosión, siendo todos sustituidos.

Finalmente, para la recuperación total de la bomba, se procedió a un mayor pulido en el interior, pues de esta forma se garantiza la obtención de un mejor rendimiento de la misma. Además de un tratamiento total con belzona para hacer frente al ataque del mejillón cebrá, pues aunque es un tratamiento muy nuevo, es la mejor opción hasta el momento para hacer frente a esta agresiva plaga sin afectar al funcionamiento deseado en la bomba.

Se debe recordar que la reparación a la que se ha sometido a estas bombas ha sido la que se adecuaba más a las condiciones en las que se encontraban las bombas, pensando en el alargamiento de su vida útil y bajo unas condiciones económicamente beneficiosas para la empresa propietaria de las mismas.

Pero, llegado a este punto surge la cuestión de si se podría haber aplicado otros métodos para su recuperación, por lo que a continuación se realizará un análisis crítico de la recuperación:

- El hecho de no haber sometido a la empaquetadura exterior a ningún método de recuperación ha sido la idea más económica, pues aunque presentaban algunas zonas con desgastes, no son piezas que afecten al funcionamiento directo, por lo que en una reparación de estas envergaduras donde los costes de recuperación son considerables ha sido la idea más económica.
- Los ejes se encontraban en pésimas condiciones por lo que la única opción que pudo considerarse fue la de su sustitución.

Sin embargo, en el caso de que las condiciones hubiesen sido mejores y el desgaste hubiese sido menor, podrían haberse planteado muchas opciones para su recuperación. Una de las posibilidades, en el caso de ser necesario añadir material a los ejes en las zonas requeridas, hubiese sido la posibilidad de someterlas a algún tipo de método de recargue o de soldadura. Esta opción queda completamente prohibida en estos casos, ya que la soldadura puede provocar modificaciones de la estructura del material completamente indeseadas. Además de que cualquier pequeño fallo en la aplicación del método de recargue acabaría conduciendo al desprendimiento del material aportado, causando consecuencias nefastas y peligrosas para la bomba.

En el caso de que los ejes a recuperar puedan ser medidos y presenten una mínima desviación de su linealidad, una opción para su recuperación es la de ser sometidos a un proceso de deformación plástica. De este modo se conseguiría devolver la linealidad al eje, además de poder recuperar las dimensiones requeridas para su correcto servicio. Sin embargo, no se le podría haber sometido a un proceso de deformación térmica, pues al igual que en el caso de las soldaduras, aparecerían modificaciones indeseables en la estructura del metal.

- Cabría destacar, que la sustitución de los casquillos, tanto los del eje, como los casquillos de aspiración, es lo que se conoce como el método de recuperación por encasquillado. Donde se consigue la recuperación del eje con solo sustituir los casquillos, pues estos casquillos deben de estar diseñados para que con una sustitución periódica, se logre evitar el desgaste del eje. En este caso, no ha podido ser así, pues el tiempo de funcionamiento y las condiciones de trabajo de las bombas ha sobrepasado la vida útil de estos casquillos, lo que ha causado que finalmente se dañe el eje y sea necesaria su recuperación. Por lo que, llevando a cabo un empleo correcto del método de encasquillado, se conseguiría el alargamiento de la vida útil del eje de forma significativa.
- El rellenado de picaduras mediante pastas y compositex resulta la opción más fácil de aplicar y obteniéndose muy buenos resultados, de acuerdo a las propiedades de los productos utilizados. Sin embargo, puede plantearse la opción de aplicar otros métodos de recuperación por fundición, logrando la reconstrucción de las zonas que han perdido el material. Pero la necesidad de diseñar un molde específico, todo el material de relleno que se desperdicia y que se trata de una pieza que no ha sido fabricada por fundición (debido a que no se garantizarían los requisitos mecánicos de la pieza durante su funcionamiento) hacen que sea una opción excesivamente cara e inadecuada para llevar a cabo en esta recuperación.
- La aplicación del recubrimiento especial de belzona para luchar contra el ataque del mejillón cebra es la opción considerada por ser la que mejor resultados ha dado, por ser económicamente viable y por presentar un método de aplicación no excesivamente complicado. Pero podría plantearse la opción de investigar la existencia de algún elemento que no se viese afectada por la sustancia segregada por estos moluscos y que pudiese ser aplicada mediante un galvanizado. Sin embargo, el hecho de aplicarlo mediante este método elevaría su coste considerablemente, pues se requeriría de un equipo especial para su aplicación. Sin olvidar que se trata de uno de los métodos de recuperación más contaminantes que existe.

Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones

Gracias al estudio llevado a cabo durante este trabajo, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- La importancia de los métodos de recuperación en el alargamiento de la vida útil de las piezas y su necesidad en algunas industrias para la continuación de su operación de manera económicamente viable.
- La necesidad obligada de la disminución del uso de los métodos de recuperación más contaminantes y peligrosos como los métodos galvánicos, a favor de métodos como los de termodifusión, proyección térmica o metalización.
- El continuo desarrollo de nuevos y novedosos métodos como el caso del encasquillado.
- Destacar que no es necesaria la aplicación de métodos extremadamente complejos para la obtención de grandes resultados, tal y como demuestra los métodos de recuperación por resinas y pegamentos. Que se han convertido en uno de los métodos más empleados y en mayor estudio en la actualidad.
- La recuperación de las piezas evita el desembolso de grandes cantidades, necesarias para la compra de nuevas piezas. Pues aun implicando un gran trabajo, resultan económicamente mucho más beneficiosas, pues la fabricación de piezas nuevas suponen unos costes muy superiores.

Capítulo 5: Bibliografía

1. Aimplas. 31 de Julio de 2015 <https://www.aimplas.es/blog/nuevo-metodo-sostenible-y-eficiente-de-metalizacion-gracias-a-la-nanotecnologia/>
2. BARRON Guardia, Roque Fernando. Recuperación de elementos sometidos a desgaste en maquinaria pesada por medio de soldadura. Informe de suficiencia (Ingeniero Mecánico). Lima, Perú : Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, 2003. 149 p.
3. BERNAL Leyva, Adrián. Análisis y solución de la avería del árbol de una bomba centrífuga de la Central Termoeléctrica de Cienfuegos por desgaste en la zona de la empaquetadura. *Ciencia & Futuro* [en línea]. 2012, vol. 2, no. 1. [fecha de consulta: 25 Agosto 2019].
Disponible en:
<file:///C:/Users/Maria/Downloads/621-869-1-SM.pdf>
ISSN: 2306-823X
4. BONILLA Chang, Byron José. Reconstrucción y / o reparación de piezas de fundición gris, por medio de soldadura al arco (SMAW). Trabajo de Graduación (Maestro en Ingeniería de Mantenimiento). Guatemala : Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado, 2015. 134 p.
5. BORJA Murgueitio, Luis Felipe y Enríquez Yépez, Rubén Patricio. Estudio para la recuperación de cigüeñales de motores diesel. Tesis (Título de Ingeniero en Mecánica). Quito, Ecuador : Universidad Internacional del Ecuador, Facultad de Ingeniería Automotriz, 2014. 141 p.
6. CHAMBI Paucar, Helber Giovanni. Análisis de la recuperación del pestillo de compuerta de cucharón de pala mecánica 3800 – 4100 por proceso de soldadura SMAW. Tesis (Ingeniero Metalurgista). Arequipa, Perú : Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Ingeniería de Procesos, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, 2014. 125 p.
7. CONCEPCIÓN Concepción, Esney. Evaluación preliminar para la recuperación y fabricación de las camisas del motor YUCHAI. Trabajo de Diploma. Santa Clara : Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, 2016. 61 p.
8. DESARROLLO y aplicación de la teoría de los tubos compuestos de dos materiales diferentes en la recuperación del cuerpo del distribuidor hidráulico de la alzadora BMH – II por Rafael Antonio Goytisol Espinosa [et al]. *Revistas Científicas UAC* [en línea]. Julio-diciembre 2009, vol. 7, no. 2. [fecha de consulta: 1 Agosto 2019]
Disponible en: <http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1351>
9. GÓMEZ Estévez, Andrés. Aplicación de subproductos y derivados de la agroindustria azucarera en el mantenimiento de la propia industria. *Redalyc* [en línea]. Mayo-agosto 2006, vol. 40, no. 2. [fecha de consulta: 15 Agosto 2019]
Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664001.pdf>
ISSN: 0138-6204
10. GUALÁN Jiménez, Henri Holger y Venegas Tornado, Richard Santiago. Diseño y construcción de un prototipo de cámara de vacío para el recubrimiento metálico en plásticos para el laboratorio de metalurgia de la F.I.M.E – E.S.P.E. Proyecto previo a la obtención del título (Ingeniero Mecánico). Sangolquí : Escuela Politécnica del Ejército, Facultad de Ingeniería Mecánica, 2006. 146 p.

11. GUEVARA Leiva, Alexis Roberto. Recuperación de los cojinetes de deslizamiento del árbol de levas del motor YUCHAI. Trabajo de Diploma. Santa Clara, Cuba : Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Investigaciones de soldadura (CIS), 2016. 88p.
12. GUZMÁN López, Horacio. Estado del arte del proceso de soldadura láser ND: YAG, en la recuperación de componentes de acero grado herramienta H13. Monografía en opción como especialista en tecnología de la soldadura industrial. Saltillo, Coahuila : Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, División de Estudios de Posgrado, 2011. 92 p.
13. HERNÁNDEZ Arias, Francisco Luis y FONT Pérez, María Elvira. Reacondicionamiento de piezas de hierro fundido por tratamiento térmico (II Parte). *Ciencias Holguín* [en línea]. Abril-junio 2008, vol. 14, no. 2. [fecha de consulta: 17 Agosto 2019].
Disponible en: <http://www.ciencias.holguin.cu/index.php/cienciasholguin/article/view/429/301>
ISSN: 1027-2127
14. KSB. La tecnología que deja huella. Sevilla, España : Universidad de Sevilla, Master Mantenimiento Industrial, 2017. 85 p.
15. KSB ServiceSuciba. Formación de bombas centrífugas. pp.1-85
16. LA tecnología de recuperación y protección contra el desgaste están en el rociado térmico por José Luddey Marulanda Arévalo [et al]. *PROSPECTIVA* [en línea]. Enero-junio 2014, vol. 12, no. 1. [fecha consulta: 17 Agosto 2019]
Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250639009.pdf>
ISSN: 1692-8261
17. LAS arenas negras de Mejías: nueva fuente para la obtención de consumibles para la soldadura por arco eléctrico por Rafael Quintana Puchol [et al]. *Minería y Geología* [en línea]. 2001, vol. 18, no. 2. [fecha de consulta: 25 Julio 2019].
Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/204/pdf>
ISSN: 0258-5979
18. MANUAL de recuperación de piezas por Osmary Ortiz Núñez [et al.]. Ciudad de la Habana : CIME, 1993. 403 p.
ISBN: 9590500676
19. MARTÍNEZ Pérez, Francisco. La tribología. Ciencia y técnica para el mantenimiento [en línea]. Balderas, México : LIMUSA, 2002 [fecha de consulta: 7 Marzo 2019].
Disponible
https://books.google.es/books?id=ht0KP_lscosC&pg=PA28&lpg=PA28&dq=formacion+de+puentes+soldados+entre+puntos+de+contacto&source=bl&ots=UnzVIJqk33&sig=ACfU3U3WO_2TzHx2AWMUWJ3cBgGQ3xlow&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj4ofPhy8LhAhXnUxUIHZ25DawQ6AEwBHoECACQAQ#v=onepage&q&f=false
20. MARULANDA, José Luddey y TRUJILLO S., Gonzalo. Recuperación de piezas desgastadas con recubrimientos protectores. *Scientia et Technica* [en línea]. Diciembre 2007, vol. 1, no. 37. [fecha de consulta: 17 Agosto 2019].
Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4061/2221>
ISSN: 0122-1701
21. Metalizadosgines. 2014 <http://www.metalizadosgines.com/metalizacion-y-acabados-por-alto-vacio/>

22. MIRANDA Coronel, Javier Alejandro. Recuperación de Paredes Erosionadas en los Ductos de Escape de Cabezotes de Motores de Generación a Crudo Wärtsilä V1832LN, mediante Metalización. Trabajo de titulación (Ingeniero Mecánico). Quito, Ecuador : Universidad de San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería, 2018. 58 p.
23. Monografias. Rocio. <https://www.monografias.com/docs114/proceso-piezas-plastico-metalizadas-alto-vacio/proceso-piezas-plastico-metalizadas-alto-vacio.shtml>
24. OSORIO Alzate, Diego Mauricio. Estudio de la corrosión sufrida a altas temperaturas por sales fundidas en aceros para caldera tipo ASTM A193 y ASTM A53. Trabajo de investigación formativa. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica, Programa de Ingeniería Mecánica, 2017. 60 p.
25. RODRÍGUEZ Pérez, Osmundo Héctor. Soldadura de hierros fundidos. Recomendaciones tecnológicas. *Ciencias Holguín* [en línea]. Octubre-noviembre 2013, vol. 19, no. 4. [fecha de consulta: 25 Julio 2019]
Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181559399004.pdf>
ISSN: 1027-2127
26. SELECCIÓN de electrodos para la recuperación de las tapas de cilindros del motor de la locomotora tgm8k por Pablo Oñoz Gutiérrez [et al]. *Centro Azúcar* [en línea]. 2017, vol. 44, no. 1. [fecha de consulta: 26 Julio 2019]
Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612017000100003
ISSN: 2223-4861
27. Sergabi. <http://www.sergabi.com/metalizacion/>
28. Wikipedia. 10 de mayo 2017 <https://es.wikipedia.org/wiki/Metalizaci%C3%B3n>