

## TEROLOGÍA: TECNOLOGÍA DE LA RECONSTRUCCIÓN

### RESUMEN

Este artículo describe los principales procesos utilizados en terología (tecnología que se ocupa del estudio de la recuperación y reconstrucción de piezas), y la forma de controlar el desgaste y corregirlo mediante la aplicación de recubrimientos protectores.

Para comprender el extenso campo de aplicación que actualmente tiene la terología o la soldadura de mantenimiento en la conservación de los recursos no renovables utilizados en industria moderna, y el amplio campo para la investigación y desarrollo tecnológico en ésta área, se hace necesario considerar previamente los rigurosos estudios de la tribología

**PALABRAS CLAVES:** Terología, Tribología, Materiales Ferrosos, Espectrometría, Material de Aporte, Recubrimiento, Soldadura de Mantenimiento.

### ABSTRACT

*This article describes the main processes used in terology (technology related to the study of the recovery and reconstruction of materials), and the form of controlling wear by application of protective layers.*

*To understand the broad application field of the maintenance welding in the conservation of the non renewable resources used in modern industry, as well as the possibilities for investigation and technological development in this area, it becomes necessary to consider some tribological issues previously*

**KEYWORDS:** *Terology, Tribology, Ferrous Materials, Spectrometry, Base Material, Filler Metal, Recover, Maintenance Welding.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la ciencia de la soldadura ha cimentado en la terología su filosofía de optimizar el uso de los recursos no renovables, de esta forma se viene motivando la tecnología del reprocesamiento y reconstrucción para enfrentar el presente drama industrial de escasez y alto costo de los materiales.

La palabra terología proviene del griego “tero” (cuidar, preservar, conservar), y el prestigioso instituto Suizo Eutectic+Castolin ha adoptado éste término como definición para la soldadura de mantenimiento [1].

Para comprender mejor el amplio espectro de aplicación de la terología, es necesario establecer la diferencia entre soldadura de producción y soldadura de mantenimiento

### 1.1. SOLDADURA DE PRODUCCIÓN

El campo de la soldadura de producción comprende desde el diseño hasta la fabricación del producto, por tanto se deben definir absolutamente todas las características y propiedades de los materiales, procesos y procedimientos para el desarrollo del mismo.

La soldadura es una de las ciencias más documentadas a nivel de la soldadura de producción, basta con referirse a

### ALBERTO ZAPATA MENESES

Ingeniero Mecánico, Especialista.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
azapata@utp.edu.co

### DAIRO HERNAN MESA GRAJALES

Ingeniero Mecánico, MSc en  
Ingeniería Metalúrgica y materiales  
Profesor Planta Asistente.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
dhmesa@utp.edu.co

los diferentes códigos, especificaciones y estándares, para determinar estas características y propiedades (llamadas variables esenciales, complementarias y suplementarias), por tanto todas las variables en la elaboración del producto, son conocidas previamente.

### 1.2. SOLDADURA DE MANTENIMIENTO

Para el caso de la soldadura de mantenimiento, existe documentación genérica, consignada en las fichas técnicas de los diferentes materiales de aporte, y las recomendaciones técnicas de las casas fabricantes de dichos materiales, esto no es un gran problema, pues el principio básico de la soldadura indica que al momento de realizarla, se debe buscar la homogeneidad, es decir, que tanto el material base como el material de aporte deben tener la misma composición y propiedades.

Una de las dificultades en la soldadura de mantenimiento se presenta cuando se desconoce la naturaleza del material base, para lo cual se debe recurrir a los análisis químicos y/o espectrométricos

Otra sería la diversidad de tipos y mecanismos de desgaste a que están expuestos los materiales, lo cual deriva a la terología la necesidad de aplicar aleaciones especiales y combinación de procesos de superiores calidades para preservar e incluso mejorar las propiedades de material base.

## 2. TIPOS DE DESGASTE [2,3,4,5]

El deterioro de metal causado por el desgaste de una pieza mecánica puede variar notablemente, de muy intenso a insignificante. En cualquier caso, resulta de ello una pérdida de eficacia o un deterioro de la pieza. El problema del desgaste se presenta en todo tipo de productos. Los casos más graves se presentan en determinadas industrias: aeroespacial, minas, ingenios azucareros, siderurgia, petróleo, química y centrales eléctricas, por no citar más que algunas.

La terología puede contribuir a la solución de numerosos problemas asociados al desgaste, mediante la aplicación de aleaciones diseñadas específicamente para combatir cada uno de los mecanismos de deterioro.

Con el objeto de seleccionar un sistema de aleación apropiado para cada caso, es de primordial importancia poder determinar, con el mayor grado de aproximación posible, el tipo de desgaste al cual se le atribuye el fenómeno de deterioro.

### 2.1. Abrasión

Término utilizado para describir el desgaste ocasionado por el movimiento relativo de partículas duras sobre una superficie. Un esquema de este tipo de desgaste se muestra en la figura 1.

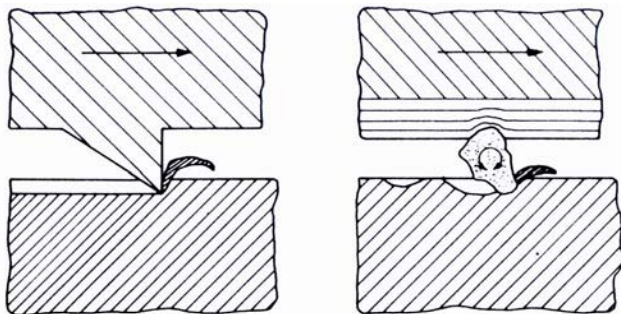


Figura 1. Desgaste por abrasión a) de alto esfuerzo, b) de bajo esfuerzo [5].

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

mismas sobre la superficie y la velocidad relativa partículas-superficie.

La abrasión puede ser subdividida en tres grupos característicos [2,4]:

#### 2.1.1. Abrasión pura o de bajo esfuerzo

Ocurre cuando las partículas se deslizan libremente sobre la superficie a un ángulo de incidencia pequeño (menor a 15 grados)

#### 2.1.2 Abrasión de alto esfuerzo

Fenómeno de surcado, producto del contacto a altas presiones del abrasivo sobre la superficie. Este tipo de desgaste está tipificado en las masas de los rodillos trituradores de los ingenios azucareros, en donde partículas de arena, la caña de azúcar, etc. Son desplazadas bajo altas presiones El deterioro ocurre por flujo plástico local y agrietamiento microscópico de la superficie de la masa, exacerbado por fenómenos corrosivos. [2,5]

#### 2.1.3 Abrasión por desgarramiento (Gouging)

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

### 2.2 Erosión (Impacto)

A diferencia de la abrasión, en la erosión el elemento abrasivo es proyectado por un medio fluido o gaseoso contra la superficie del metal, así parte de la energía cinética es absorbida por la pieza, causando deformación elástica o remanente en función del grado de tenacidad del metal, y la otra es absorbida por la partícula abrasiva, ya sea como velocidad de rebote o energía que lleva a la partícula a fracturarse.

El tipo de desgaste por impacto se debe analizar entonces desde el enfoque de transferencia de energía y la consecuencia en la superficie impactada, así:

Al impactar un metal dúctil, éste se endurece, posterior a la deformación se agrieta y finalmente pequeñas partículas metálicas se desprenden

En el caso de un metal frágil, este se agrieta sin deformarse, donde finalmente, y debido al agrietamiento producido, se desprenden grandes partículas de material. Si el material es impactado por partículas pequeñas, éstas producen en la superficie agrietamiento y rápida fractura, regularmente sin desprendimiento de metal. [6,7]

La capacidad que tiene un metal de absorber la energía proveniente de impactos, viene en gran parte determinada por la tenacidad y resiliencia del mismo, los aceros al manganeso austeníticos o “Hadfield” constituyen un ejemplo típico de aleación tenaz, así como los aceros inoxidables austeníticos. Este tipo de desgaste puede verse en la figura 2.

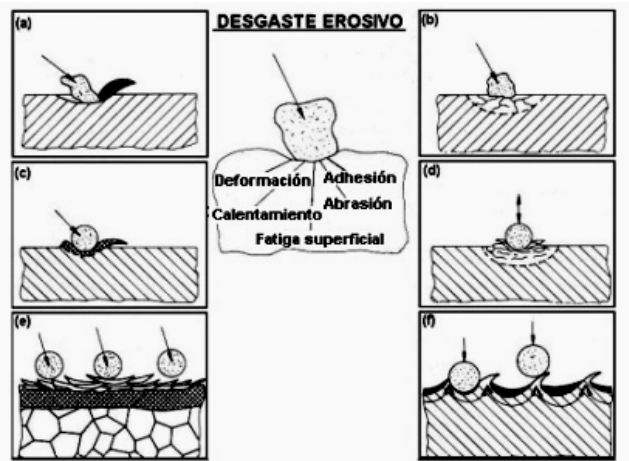


Figura 2. Formas de actuación de las partículas en el tipo de desgaste erosivo [5].

### 2.3. Cavitación

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

Existen muchas teorías acerca del desgaste superficial por cavitación, la teoría de Beeching es la más aceptada, sostiene que “el deterioro por cavitación es la desintegración mecánica de las capas superficiales bajo altos puntos de presión localizados y repetidos. Estos pulsos son ocasionados por la repentina desaparición de las burbujas en contacto con la superficie o cercana a ésta”. La cavitación por tanto involucra la formación y posterior implosión de burbujas generadoras de ondas de choque bastante energéticas, capaces de degradar la superficie de las piezas.[4]

### 2.4. Corrosión:

La corrosión es uno de los fenómenos más importantes y destructivos dentro de la gama de desgastes anteriormente definida, debido a la variedad de formas en las cuales se manifiesta. Se puede definir la corrosión

como un ataque de tipo químico o electro-químico sobre un material, debido al ambiente que lo rodea. Existen dos formas básicas de corrosión, así: [8]

#### 2.4.1 Corrosión por oxidación

Es una reacción química entre el metal y el ambiente que lo rodea, sin iniciar una corriente eléctrica. Los metales tienen distinta afinidad con el oxígeno y se combinan con el para formar diferentes óxidos metálicos. La difusión o extensión de la oxidación hacia el interior del metal, depende de las características de la capa oxidada. Si la capa es estable e impermeable, se convierte en capa protectora, si es permeable y poco estable, la oxidación se extenderá al interior del metal. La velocidad de oxidación depende de las propiedades del metal, y lo más importante, de la temperatura

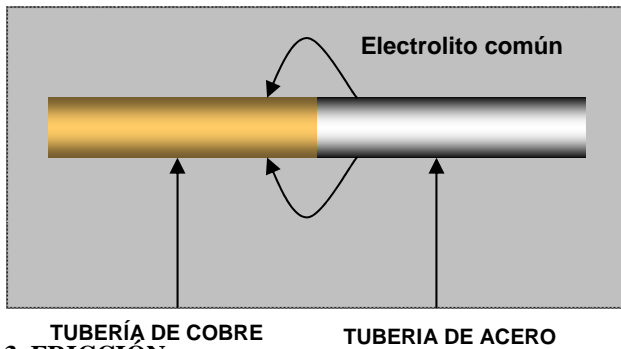
La abrasión sumada a la corrosión acelera el desgaste del metal, a consecuencia de la destrucción continua del óxido estable y protector. Los óxidos de cromo y aluminio proveen una película protectora estable, en ellos la penetración de la oxidación es muy reducida incluso a altas temperaturas.

#### 2.4.2 Corrosión Electro-química

Es un fenómeno de desgaste más severo que el provocado por oxidación, pues implica una reacción química acentuada por un flujo inducido de corriente eléctrica en el sistema, como consecuencia de un medio conductor en estado líquido o electrolito. La corrosión electroquímica se desarrolla cuando existe inestabilidad química, causada entre otros factores por la concentración de oxígeno disuelto del electrolito, contacto de metales disímiles o poca uniformidad de la capa de oxidación.

La corrosión galvánica explica el desgaste en materiales disímiles en un medio conductor, ya que la afinidad química de cada metal por el electrolito es distinta. En este caso, el metal con mayor afinidad con el electrolito (más noble), se corroe mientras que el otro favorece la producción de hidrógeno en la superficie, generando así una capa protectora o pasiva.

La corrosión galvánica más simple se conoce como celda de corrosión de diferente metal. Esta celda se presenta cuando dos metales diferentes se conectan en un electrolito común. La que tenga el potencial más negativo, se corroe más rápidamente. Por ejemplo, una tubería de acero unida con una tubería de cobre, como se muestra en la figura 3



### 3. FRICCIÓN

La fricción puede definirse como la resistencia que un cuerpo opone al movimiento de otro, cuando uno de ellos o los dos presentan movimiento relativo mutuo. [4,5]

En el proceso de fricción hay pérdida de energía cinética de los cuerpos o sustancias que se mueven en relación a otras.

Alta fricción es deseable en sistemas de frenos, llanta carretera y otros, la baja fricción es deseable en sistemas pistón-anillos, lectura de cd's y otros.

El mecanismo friccional que genera pérdida de material por rozamiento de una superficie metálica contra otra, constituye uno de los más agentes activos del desgaste de partes y piezas mecánicas. Un examen microscópico de las superficies permite visualizar la micro-rugosidad real, que existe en piezas que en un examen macroscópico se ven "pulidas".

El desplazamiento relativo de una superficie contra otra produce el choque de aristas encontradas, la cual provoca deformación localizada, aumento de temperatura y ruptura de dichas aristas.

Se ha mostrado además [9], que durante el proceso de soldadura y debido a las elevadas temperaturas puntuales que se generan entre las aristas en contacto, dichas aristas micro soldadas, dan lugar a remoción de metal en aquel que tenga menor dureza. Incluso algunas de éstas partículas desprendidas se ligan al material más duro, dando lugar a la formación de una película fuertemente adherida. Por otro lado, se produce un efecto de abrasión de bajo esfuerzo al existir partículas libres en el sistema que provocan desgaste denominado de tres cuerpos.

Durante el estudio de la fricción, se han definido una serie de variables que inciden en el proceso de desgaste de piezas mecánicas, estas son:

#### 3.1 Variables metalúrgicas:

- Materiales en consideración.
- Estructura de éstos materiales y como se ven afectados térmicamente.

- Efecto de uno de los materiales difundiéndose en el otro

#### 3.2 Variables físicas

- Temperatura de fusión de los metales
- Dureza de los metales
- Conductividad térmica
- Capacidad calórica
- Densidad.

En el caso de la temperatura, la reacción de los metales a los choques térmicos (dilatación y posterior contracción), en espacios de tiempo reducidos, constituyen un factor decisivo en el desgaste de los materiales, ya que esta variable constituye uno de los principales mecanismos por los cuales se da la generación de fracturas, microfisuras y ablandamiento, adicionalmente las altas temperaturas, generadas durante la fricción, actúan como acelerante de la corrosión por oxidación.

#### 3.3 Variables mecánicas:

- Módulo de elasticidad de los metales
- Coeficiente de Poisson
- Presión de trabajo

#### 3.4 Otras variables:

- Rugosidad de las superficies
- Tratamiento térmico
- Velocidad relativa de las superficies en contacto
- Presencia o ausencia de lubricación.

## 4. PROCESOS TEROLÓGICOS

Uno de los factores más importantes en la recuperación de partes y piezas es la selección adecuada del proceso de soldadura de mantenimiento, lo que permite incluso, mejorar las propiedades originales de la pieza a tratar, en esta vía, los fabricantes deberían realizar preventivamente recubrimientos protectores en zonas críticas de sus productos, muchos de ellos ya lo están haciendo y es ahora una normatividad en la fabricación.

Antes de escoger el proceso terológico, es necesario diagnosticar el tipo y causa del desgaste o falla, y determinar todas las características del material a tratar; al realizar este diagnostico, encontraremos que normalmente los mecanismos de desgaste son combinados, lo cual implica la utilización de varios tipos de materiales de aporte y varios procesos terológicos.

Los procesos terológicos más utilizados para aplicar recubrimientos protectores, se dividen en procesos de liga metalúrgica por fusión y difusión y los aplicados a bajas temperaturas sin fusión del metal, y por debajo de la

temperatura de revenido si éste ha sido tratado térmicamente.

Los procesos de liga metalúrgica por fusión, pueden realizarse con los siguientes procesos de soldadura  
 Arco eléctrico SMAW (Shielded Metal Arc Welding)  
 Tungsteno en gas inerte GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)  
 Metal en gas inerte GMAW (Gas Metal Arc Welding)  
 Corazón fundente FCAW (Flux Cored Arc Welding)  
 Arco sumergido SAW (Submerged Arc Welding)

Estos procesos son los comúnmente utilizados en la recuperación de partes y piezas aplicando el material de aporte adecuado. [9,10,11,12]

A partir de la década de los 70'S se vienen desarrollando nuevos procesos para recuperación superficial, a partir del aporte pulvimetalúrgico (micropolvos) especialmente por el Instituto Suizo Eutectic+Castolin. [13]

Oxiacetileno OAW (Oxiacetylene Arc Welding)  
 Eutalloy (proceso de Eutectic-Castolin que utiliza micropolvos como material de aporte y como fuente de energía el proceso oxiacetileno)

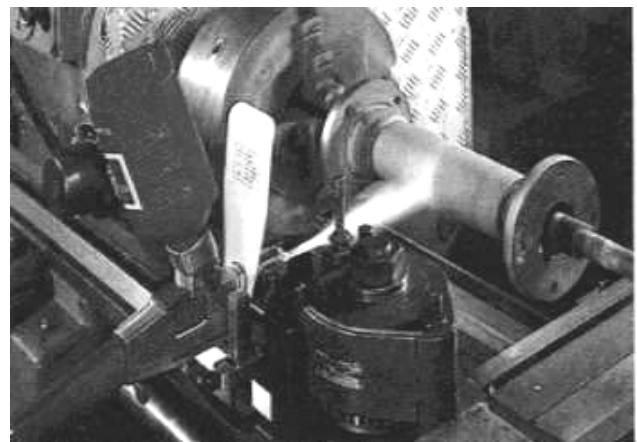
Para el caso de liga sin fusión (a baja temperatura) se utilizan los procesos de pulvimetalurgia o micro polvos, el instituto Eutectic+Castolin ha desarrollado los siguientes equipos

Proceso Terodyn  
 Proceso Rototec  
 Proceso Teromatec (similar al proceso de arco sumergido, en cuanto a que el aporte viene en rollo)

Estos procesos pueden ser vistos en los esquemas de la figura 4



b)



c)



a)



d)

Figura 4. Procesos pulvimetalúrgicos para recuperación de piezas, a) Eutalloy, b) Terodyn c) rototec y d) teromatec. [1]

## 5. CONCLUSIONES

A la hora de implementar la recuperación de una pieza deteriorada, es importante conocer el tipo(s) y/o mecanismo(s) de desgaste o corrosión operante, para así entrar a diagnosticar el tipo de falla.

Los procesos terológicos desarrollados en los últimos 30 años, han demostrado ser una importante alternativa económica y ambiental, toda vez que los altos costos de producir partes y piezas, así como los altos costos que generan los grandes inventarios de repuestos se han reducido substancialmente.

Los grandes desarrollos tecnológicos de los nuevos procesos de soldadura de mantenimiento, brindarán la posibilidad de recuperar materiales que por otros métodos sería imposible de realizar.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Instituto Eutectic-Castolin: "the Tero-Care Program", 1980

[2] AVNER, S. : Introduction to Physical Metallurgy", Mc. Graw-Hill, 1974.

[3] LIPSON, C : "Wear Considerations in Design", Prentice – Hall, N.J

[4] HUTCHINGS, I. M. Tribology Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge, 1992, p 133- 171.

[5]. ZUM GAHR, C. "Microstructure and Wear of Materials". Tribology Series, 10. Elsevier, 1987.

[6].FINNIE, I. "The mechanisms of erosive wear in ductile materials". Corrosion-Erosion Behavior of Materials, K.Natesan, Ed. AIME, New York, 1980, pp. 118-126.

[7].TILLY, G.P; "A Two Stage Mechanism of Ductile Erosion". WEAR, 23, 1973.

[8]. WRAIGTH, I. G.; SETHI, V. K.; MARKWORTH, A. J. "A Generalized description of the Simultaneous processes of Scale Growth by High-temperature Oxidation and Removal by Erosive Impact. WEAR 186-187, 1995, Pp. 230-237

[9]. ZAPATA M. Alberto, Manual técnico de soldadura, en edición

[10]. STREETER, J. "Introducción a la soldadura de aceros". Instituto Eutectic+Castolyn, 1980

[11] AMERICAN WELDING SOCIETY: "Welding journal: Weld Repair Saves Airline Millions", Ed. AWS, volume 83 Number 8, ISSN0043-2296/2004

[12] AMERICAN WELDING SOCIETY: "Welding journal: Cold Spray", Ed. AWS, volume 93, Number 10, ISSN0043-296/2005

[13] OSBORN, A.: Sistemas Pulvimetalúrgicos: Conferencias Técnicas y Procesos"