

RECUPERACIÓN DE PIEZAS DESGASTADAS CON RECUBRIMIENTOS PROTECTORES.

Recovery of wearing pieces with protective coatings

RESUMEN

En casi todas las industrias hay desgaste de piezas y maquinaria, por lo cual se requiere de minimizar este desgaste y recuperar estas piezas obteniendo una mayor relación costo- beneficio, además de aumentar las horas de servicio y la eficiencia de los equipos. Para hacer una buena selección del tipo de revestimiento protector y su aplicación, se necesita conocer los tipos de desgaste a los que puede estar sometido la pieza que se quiere proteger. Los recubrimientos duros pueden controlar todos los tipos de desgaste, pero un mismo recubrimiento no soluciona todos los tipos de desgaste.

PALABRAS CLAVES: Desgaste, Falla, Polímeros, Protección, Revestimientos Duros, Recuperación, Soldadura y Técnicas.

ABSTRACT

Almost all the industries have wearing of pieces and machinery, thus is required to diminish this wearing and recover these pieces obtaining a greater relation cost- benefit, besides to increase to the hours in service and the efficiency of the equipment. In order to make a good selection of the type of protective coating and its application, it is needed to know the types wearing to which it can be put under the piece that is wanted to protect. The hard coatings can control all the types of wearing down, but the same coating does not solve all the types of wearing.

KEYWORDS: Fail, Hard Coatings, Polymers, Protection, Recovery, Techniques, Wear and Weld.

1. INTRODUCCIÓN

Los revestimientos duros y la soldadura de mantenimiento prolongan la vida útil de la maquinaria, al obtener altos rendimientos durante más tiempo y reducir el número de fallas. La avanzada tecnología de los recubrimientos, provee a las industrias, uno de los medios más eficaces para combatir el desgaste prematuro, adelantándose a la falla o al momento en que el equipo deja de trabajar en sus condiciones óptimas. De esta forma se optimiza la disponibilidad de la maquinaria, se disminuye costos de mantenimiento y se maximiza la vida útil. Los recubrimientos duros que se aplican al mantenimiento industrial son para aumentar la disponibilidad inmediata de repuestos y disminuir costos de reparaciones. Con ello se logra un aumento en la disponibilidad de sistemas críticos y se reduce drásticamente la compra de repuestos.

Son muchos los factores que pueden afectar una pieza o estructura metálica, causando daños o deformaciones en estas, las cuales van en detrimento de las propiedades del material y en la economía de las industrias. Entre estos factores se pueden mencionar, el desgaste, la fatiga y la corrosión. El desgaste es uno de los principales responsables por la mayor parte de deterioro y salida de

JOSÉ LUDDEY MARULANDA

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.

Profesor Auxiliar

Universidad Tecnológica de Pereira

jlmarulanda@utp.edu.co

GONZALO TRUJILLO S.

Auxiliar de ingeniería Mecánica.

Experto en plásticos.

Profesor Auxiliar

Universidad Tecnológica de Pereira

gontru@utp.edu.co

servicio de piezas mecánicas, mientras la corrosión es la responsable por el deterioro de estructuras metálicas. Por otro lado, la fatiga sólo causa daño cuando la pieza o elemento mecánico sobrepasa el valor de los esfuerzos cíclicos admisibles. Son varias las formas en que el hombre ha tratado de recuperar piezas deterioradas, y una de ellas es la utilización de recubrimientos duros. [12]

Generalmente, hay una interacción de los diferentes mecanismos de desgaste y es así como en un sistema de succión podemos encontrar erosión, cavitación y fatiga térmica y en los álabes de una turbina se puede tener erosión y corrosión. Una vez se ha determinado los mecanismos de desgaste presentes en un equipo o componente, se recurre a la ciencia de materiales para determinar qué aleación o recubrimiento, ya sea metálico, polimérico, cerámico o una mezcla de ellos, permite prolongar su duración en servicio. Efectuada la selección del recubrimiento resistente al desgaste, se debe determinar el procedimiento con el cual se aplicará la aleación o esquema resistente al desgaste. El uso de revestimientos duros para mejorar la resistencia al desgaste de componentes mecánicos ha sido común en varias décadas, con diferentes técnicas de aplicación, que incluyen soldadura especiales, rociado térmico,

electrodeposición, deposición física de vapor (PVD) y deposición química de vapor (CVD).

Los diversos tipos de revestimientos pueden ser usados para combatir efectivamente todos los tipos de desgaste, incluyendo situaciones donde el desgaste es combinado. El análisis para la elección del revestimiento ideal y del proceso de aplicación debe tener en cuenta factores de costo y eficiencia a mediano y largo plazo, con miras a las limitaciones y especificaciones de cada proceso. Como ejemplo, a pesar de que la resistencia al desgaste de los revestimientos de PVD y CVD son bastante elevadas, estos revestimientos son normalmente finos y no muy resistentes al impacto o cargas con partículas abrasivas grandes. Además, el componente a ser revestido puede ser demasiado grande para ser revestido en una cámara de PVD o CVD, o presentar otras restricciones geométricas o térmicas a estos procesos. Los revestimientos aplicados por soldadura y rociado térmico son usados para resistir muchos tipos de desgaste en prácticamente todo tipo de industria. Los materiales usados varían desde aleaciones blandas a aleaciones duras, pasando por carburos. [3,8,11]

Es frecuente, especialmente cuando se hacen trabajos de reparación, que un soldador tenga que identificar de manera general el tipo de material base, para poder seleccionar el metal de aporte y el procedimiento de soldadura más apropiado. Esto significa que el soldador debe tener varios métodos confiables, precisos y rápidos para identificar los metales. Entre las principales pruebas que un soldador puede utilizar de manera sencilla y rápida, se tienen: Prueba visual, prueba magnética, prueba del ácido, prueba de chispa, prueba de lima, historial de la pieza y la superficie de fractura en su forma, volumen, apariencia del grano en la rotura y forma de la rotura.

2. RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

El desgaste es la pérdida progresiva de material en la superficie de trabajo de una pieza o cuerpo. Ahora, para hacer una buena selección del tipo de revestimiento protector y la aplicación que se necesita, para recuperar la superficie desgastada, hay que conocer los tipos de desgaste a los que puede estar sometida la pieza que se quiere proteger, ya que un recubrimiento puede tener una alta resistencia a un determinado tipo de desgaste bajo ciertas condiciones, pero al cambiar la forma del desgaste debido al cambio de las condiciones originales, el recubrimiento puede no responder de buena forma y no funciona. Los tipos de desgaste más conocidos son:

Abrasión: Es el desgaste causado por el movimiento de partículas sobre una superficie, pudiéndose dividir en 1) abrasión de bajo esfuerzo, ocasionado por pequeñas cargas y sin fracturar el material abrasivo, 2) abrasión de alto esfuerzo, ocasionado por grandes cargas y

generalmente el material abrasivo atrapado entre las dos superficies se fractura y 3) abrasión por desgarramiento, donde el material abrasivo es grande y el desgaste está combinado con impacto.

Desgaste por deslizamiento: Es el desgaste originado por el deslizamiento entre dos superficies metálicas sin la presencia de material abrasivo y con o sin lubricación.

Erosión: Es el desgaste originado por la acción de partículas que son transportadas por un fluido y que impactan la superficie de la pieza. La pérdida del material esta relacionada con el ángulo de incidencia, el tipo de material impactante, el tamaño, la velocidad y la forma de las partículas. Estas variables influyen en la selección del tipo de revestimiento, ya que para ángulos pequeños, se requiere de alta dureza de este y para ángulos grandes lo que se necesita es de gran tenacidad.

Cavitación: Es el desgaste originado por la implosión de burbujas producidas en una zona de baja presión, en un sistema que maneja fluidos, donde la energía liberada durante la implosión de estas burbujas causan picaduras en el metal.

Impacto: Es el desgaste originado por un cuerpo que tiene una velocidad y choca contra otro, para que un material pueda soportar impactos debe tener una alta tenacidad.

Corrosión: Es el desgaste originado por una reacción química o electroquímica entre un metal o aleación y su medio ambiente, en donde los átomos metálicos superficiales pasan a compuestos químicos o minerales.

2.1. Recuperación por soldadura

Los tipos de desgaste pueden aparecer solos o combinados y se deberá seleccionar el electrodo que deposite el revestimiento protector que resista de la mejor manera a los diferentes tipos de desgaste, al que esta sometida la pieza. Para seleccionar el revestimiento más adecuado se debe identificar el tipo de desgaste y el metal base. La aplicación de recubrimientos duros en superficies deterioradas consiste en depositar alguna clase de aleación especial sobre una parte metálica, por alguno de los diversos métodos, para formar una superficie que resista los fenómenos de desgaste anteriores o alguna combinación de ellos. Para una buena aplicación del revestimiento protector, hay que tener en cuenta la preparación superficial y para esto hay que limpiar la zona de soldadura de suciedad, grasas, aceites, óxidos y contaminantes, remover el material corroído, deformado o fatigado, se deben reparar la grietas con aleaciones compatibles con el metal base y en lo posible tratar de soldar en posición plana. [12]

La selección de una aleación para recubrimiento duro en una superficie metálica, se basa en los ahorros y ventajas que se obtienen por la aplicación de la aleación. Tales ahorros y ventajas provienen del aumento de la producción, el uso de un menor inventario de piezas de repuesto y la reducción de tiempos muertos. Prácticamente, en todas las aplicaciones de

recubrimientos duros en superficies, los materiales de recubrimiento representan el elemento menos importante en el costo total, ya que los salarios, la producción perdida durante los tiempos muertos y las tasas de sobre costo administrativo son mucho más importantes.

La selección del proceso de soldadura más adecuado puede ser tan importante como la selección de la aleación de recubrimiento duro. Al escoger dicho proceso, junto a los requerimientos de servicio, deben considerarse las características físicas de la pieza de trabajo, las propiedades metalúrgicas del metal base, la forma y la composición de la aleación para el recubrimiento, los requisitos, en cuanto a las propiedades y calidad del depósito de soldadura, la habilidad del soldador y el costo de la operación. Se deben coordinar por lo menos tres de los siguientes factores en la aplicación de un recubrimiento; el metal base, la composición y la forma de la pieza, la aleación del recubrimiento y el proceso de soldadura. En la figura 1. Se observa la protección de una uña del balde de una retroexcavadora.



Cuando las piezas están muy desgastadas, es necesario restaurarlas cerca de su forma y medida original antes de aplicar el revestimiento protector, para esto se usan aleaciones compatibles con el metal base y el revestimiento protector, que tengan buena resistencia al tipo de desgaste sufrido por la pieza, que tengan una buena tenacidad y en ciertas ocasiones, se usa metal de aporte similar al metal base, pero casi siempre no es la mejor opción, sólo cuando la pérdida de metal base es muy grande y se pueden utilizar postizos. [3]

En el proceso por arco eléctrico se recomienda realizar dos pases de revestimiento protector de alta dureza (mas de 55 HRC), para obtener la mejor condición de servicio, debido a que en el primer pase se produce cierta dilución o mezcla con el metal base y no se puede garantizar las propiedades del revestimiento, ya en el segundo pase se obtienen todas las propiedades de resistencia al desgaste del revestimiento, por otro lado, un tercer pase podría arrancar los pases de revestimiento o fisurarlo, por tal motivo no se recomienda un tercer pase con revestimiento protector de alta dureza. En la maquinaria de movimiento de tierra, la selección de la forma del cordón de soldadura está relacionada a las condiciones de servicio, ya que la forma del cordón de soldadura puede influir en el tiempo de servicio del recubrimiento y en el

gasto de energía para realizar el mismo trabajo, ya que algunas formas del cordón permiten una mejor adherencia del material a mover que otras. Las formas de los cordones de soldadura más conocidos son el paso corto, cordón largo, puntos, diamante o rombo y espina de pescado. En la figura 2. Se observan diferentes tipos de cordones de soldadura.

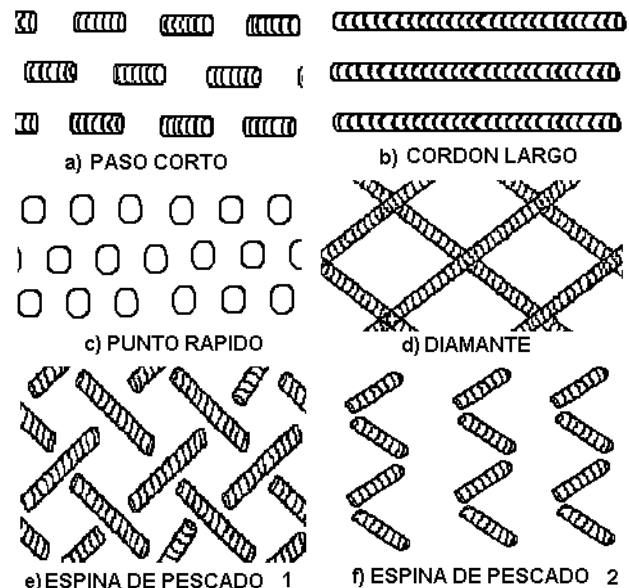


Figura 2. Algunos tipos de cordones de soldadura. [12]

En ocasiones el precalentamiento es necesario para disminuir la distorsión, evitar el choque térmico y prevenir la formación de grietas. El precalentamiento se debe realizar a la temperatura recomendada para el espesor, la forma y el metal base de la pieza que se va a soldar. El control de la distorsión y el alabeo son muy importantes a la hora de reconstruir una pieza, y para esto hay que seleccionar el diámetro de electrodo con su respectivo amperaje en función del tamaño de la pieza.

2.1.1. Recuperación de aceros al manganeso

El aumento de la dureza superficial de los aceros austeníticos al manganeso, al ser trabajados, se debe a la transformación de la austenita (blanda y dúctil) a martensita (dura y frágil). Estos aceros inicialmente no son magnéticos ya que la austenita no es magnética, pero a medida que se van deformando por el trabajo, la austenita se transforma en martensita, la cual es magnética, por tal motivo, si la pieza presenta un indicio de magnetismo, indicará la presencia de martensita en la superficie. El mecanismo completo del aumento de la dureza durante el trabajo, aún no ha sido establecido claramente, sin embargo, se deduce que la fragmentación del grano o la orientación cristalográfica son importantes. Las piezas de acero austenítico al manganeso no deben ser calentadas por encima de 300°C o enfriadas lentamente, debido a que puede provocar una transformación de la austenita en martensita, lo que

llevaría a disminuir propiedades mecánicas como la ductilidad y la tenacidad, además de bajar drásticamente su soldabilidad, por tal motivo. Cuando se va aplicar soldadura en piezas de acero austenítico al manganeso, hay que remover o eliminar las superficies endurecidas, la zona a soldar debe estar libre de óxidos, mugre y grasas, hay que evitar todo precalentamiento y enfriamiento lento, ya que contribuiría al calentamiento excesivo de la pieza durante el proceso de soldadura, el precalentamiento sólo se hará cuando la temperatura ambiente sea menor de 5°C y este precalentamiento sólo será para sacarle el frío de la pieza. Cuando se aplique el electrodo se recomienda la técnica de cordón recto sin oscilaciones y con cordones alternados y espaciados en la pieza para evitar deformaciones excesivas y mantener el metal frío, además mantener al mínimo la dilución entre el metal base y el metal de aporte, usando amperajes bajos con electrodos de bajo amperaje. En lo posible trabajar en varias piezas al mismo tiempo, para poder aplicar pequeños cordones en cada pieza y por último contemplar la posibilidad de sumergir parcialmente la pieza en agua para que absorba calor durante el proceso de soldadura. [6]

2.1.2. Recuperación de aceros herramienta

Los aceros herramienta se deben soldar en estado recocido, pero en muchos casos no se hace por el aumento de los costos. Las soldaduras de estas piezas se aplican en condición de bonificado (Temple y revenido), teniendo en cuenta que el precalentamiento y el poscalentamiento del metal base no pueden exceder la temperatura original de revenido. El precalentamiento es muy efectivo para eliminar o reducir el agrietamiento del metal base, ya que minimiza los esfuerzos de contracción. La temperatura de precalentamiento recomendada en función del tipo de acero para herramientas es:

Aceros herramienta templados en agua	150°C
Aceros herramienta templados en aceite	200°C
Aceros herramienta templados al aire	300°C
Aceros herramienta de alta velocidad	200 - 250°C
Aceros herramienta para trabajo en caliente	350°C

El metal de aporte se debe seleccionar teniendo en cuenta los siguientes factores:

* Cuando el metal base está recocido, la composición del metal de aporte deberá ser similar a la del metal base, para que responda de la misma forma a los tratamientos térmicos posteriores y obtenga la misma dureza.

* Cuando el metal base tiene tratamiento térmico de temple, es necesario tener en cuenta el área de la junta, de manera que el metal de aporte endurezca durante el enfriamiento, en estas condiciones el metal de aporte puede ser completamente diferente al metal base.

* Se puede utilizar en el primer o primeros pases, electrodos que formen un depósito que no endurezca durante el enfriamiento, como son los electrodos de acero inoxidable y los electrodos de bajo hidrógeno. En los pases finales se utiliza un electrodo que dejen una composición de la misma dureza del metal base. Este proceso no se recomienda si la pieza va a ser templada y revenida después del proceso de soldadura.

* Cuando no se requiere de dureza, la práctica más común es realizar los cordones de soldadura con electrodos de acero inoxidable o de base níquel.

2.2. Revestimientos poliméricos

La adhesión al sustrato es la propiedad más importante de un revestimiento polimérico, ya que, sin una buena adhesión, no pueden existir adecuadamente las otras propiedades como resistencia al impacto, abrasión y corrosión entre otras. Además el estado de la superficie, en el momento de aplicación tendrá influencia en el comportamiento del revestimiento en servicio. La fuerza de adhesión de una soldadura polimérica al sustrato depende de tres factores fundamentales como son el tipo de unión entre átomos de las cadenas poliméricas y los átomos de sustrato metálico. El mojado del polímero al metal, que acerca los átomos de las cadenas poliméricas a los átomos del metal, para formar esa unión con la mayor densidad posible y la textura de la superficie del metal, que da el perfil de anclaje y que aumenta la superficie real y produce áreas de anclaje mediante cavernas cóncavas. [11]

La fuerza de unión polímero-metal, está determinada por el tipo de unión que se forma entre los átomos de las cadenas poliméricas y los del sustrato metálico, estas uniones pueden ser:

- Químicas: Que son las más fuertes, pero necesitan de grupos funcionales tanto en la molécula polimérica, como en el sustrato metálico.
- Polares: Que unen el revestimiento o soldadura polimérica al sustrato metálico con una fuerza media.
- Polares inducidas: También llamadas de Van Der Waals, que son las más débiles y son las fuerzas intermoleculares en los termoplásticos.

Para que exista un buen mojado o mojado completo, es necesario que la tensión superficial de la interface soldadura/ metal, más la interface polímero/ aire, sea menor a la del sustrato/ aire.

El anclaje del revestimiento se refiere a la textura de la superficie, esta textura genera una superficie real mucho mayor a la aparente. La reparación de la superficie que se realiza por granallado o arenado (sandblasting), produce

ese perfil de anclaje con picos y valles y se ha determinado que este sea mayor a 35 micras medidos entre esos picos y valles. El granallado o arenado no limpian la superficie. Si una superficie esta contaminada con grasas o con sales, no la removerá si no que quedará incorporada de alguna manera y afectarán la mojabilidad y la posibilidad de hacer efectivas las uniones entre átomos del polímero y el substrato, que confiere su inherente fuerza de adhesión. El granallado o arenado a su vez no deben introducir substancias contaminantes como sales solubles o restos incorporados de su uso anterior, durante su reciclado. En la figura 3. Se observa una reparación con revestimiento polimérico.



Figura 3. Reparación con revestimiento polimérico [8].

La clasificación inicial aceptada de revestimiento polimérico es la de polímeros termoestables y polímeros termoplásticos. Los polímeros termoestables son aquellos en los que las reacciones químicas se desarrollan al aplicarlo, los convierte en una capa irreversiblemente sólida, debido al fuerte entrecruzamiento entre cadenas poliméricas. Esto ocurre por reacción química entre las moléculas, en ciertos puntos específicos, distribuidos con cierta densidad y logran trabar el movimiento relativo entre estas cadenas, rigidizando la estructura. Este proceso es llamado curado. Los polímeros termoplásticos son aquellos en los que su estado sólido, aún después de aplicarlo, es delimitado por la temperatura y por las uniones de tipo Van Der Waals o polares inducidos, entre cadenas adyacentes. Estas uniones, si bien débiles, están distribuidas a lo largo de toda la molécula con alta densidad y son suficientes como para formar un sólido debajo de ciertas temperaturas críticas, por acumulación muy contigua de moléculas poliméricas. Por encima de estas temperaturas fluye como líquido. [13]

Existen limitaciones en la utilización de revestimientos poliméricos, marcados por la presión, temperatura y la composición del medio, en donde se va a recuperar la pieza. Ningún revestimiento, por más sofisticado que sea, puede operar bien, si esta mal aplicado, en efecto, la experiencia dice que el 90% de las fallas se debe a la mala preparación de la superficie, mientras que el 10% restante se debe a una mala selección del revestimiento, que es sometido a medios para el cual no fue diseñado.

La mayor parte de estos revestimientos poliméricos pueden curarse a la temperatura ambiente y pueden requerir desde unas cuantas horas hasta 48 horas. La aplicación del revestimiento puede ser en estado líquido o pastoso. La mezcla de la base polimérica con el agente curador (mal llamado catalizador), que comenzará la polimerización y el curado se realiza en muy poco tiempo antes de la aplicación. En general estos revestimientos son de muy alto contenido de sólidos en volumen, donde por sólidos en volumen, se refiere al porcentaje de sólidos que quedará en el revestimiento cuando este quede seco y curado. [11]

El curado es una reacción química por la cual se realiza el entrecruzamiento de las moléculas poliméricas, con lo que pasa de un fluido pastoso a un sólido rígido. La rigidez del sólido depende de cuan denso sea ese entrecruzamiento entre cadenas poliméricas. A mayor densidad de entrecruzamiento, mayor rigidez, dureza y resistencia química. Se debe considerar también, que a mayor dureza y rigidez hay mayor fragilidad y menor tenacidad.

La mayoría de estas formulaciones tienen ya preparadas una duración útil de media hora a dos horas, después de este tiempo, se vuelven demasiado rígidas para hacer su aplicación. El activador que presenta la fuerza para entrelazar en forma cruzada los polímeros de la resina, debe agregarse en la cantidad prescrita, para que ocurran todas las reacciones posible y no debe quedar en la mezcla ningún exceso de activador (agente curador). Por la misma razón, debe mezclarse adecuadamente el material, para asegurarse de que tengan lugar todas las reacciones.

Existen revestimientos que por su diseño químico polimérico, se pueden utilizar en servicio con un estado de curado no del todo completo, dejando un entrecruzamiento no tan denso, lo que permite mayor ductilidad y tenacidad. Cuando la temperatura de servicio es mayor a la del curado, el curado continua hasta adecuarse a esa temperatura, pero manteniendo un máximo posible de ductilidad. La dureza, la resistencia al impacto, a la abrasión y también a la corrosión, vienen dadas por la densificación de la masa polimérica, usando un cierto contenido de partículas cerámicas muy duras (Carburos de Tungsteno), embebidos en la fase polimérica. Cada partícula debe estar embebida en el polímero, sin segregación y adherida al polímero. Estas partículas muy duras e inertes, que generan resistencia al impacto y a la abrasión, obligando a un camino senoidal que deben seguir las especies abrasivas y corrosivas que penetran en el epóxido.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

* Las ventajas de los revestimientos son el aumento de la vida útil de la pieza, reduciendo costos de mantenimiento y pérdidas de tiempo, además se reduce el consumo de

energía, por la mayor eficiencia en servicio de las piezas recuperadas.

* La aplicación de recubrimientos duros por soldadura es una buena opción para recuperar piezas desgastadas, haciendo una buena selección del revestimiento en función al tipo o los tipos de desgaste que presente la pieza.

* Si se comparan los procesos de restauración por soldadura y los revestimientos poliméricos, este último ofrece diversas ventajas, como ausencia de distorsión y de zonas térmicamente afectadas, oxidación y tensiones residuales reducidas, además de recuperación de piezas en tiempos cortos.

4. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de libros:

- [1] American Society for Metals. Metals Handbook Volumen 2, Welding process. American Society for Metals. Metals Park, 1978.
- [2] P. Houldcroft. Tecnología de los procesos de soldadura. Ediciones CEAC S.A. Barcelona – España. 1990.
- [3] O. J. Gómez, Soldadura de Metales. Universidad Industrial de Santander. 1993.
- [4] Electromanufacturas S.A. Manual de Soldadura, Electromanufacturas. Bogotá. 2000.
- [5] MODENESI, Paulo. Introdução aos processos de soldagem, Belo Horizonte, Noviembre de 2000.
- [6] MEZA. Dairo H. Introducción al estudio de materiales no metálicos (Polímeros, cerámicos y compuestos). Universidad Tecnológica de Pereira. 2003.
- [7] H. Horwitz, Soldadura Aplicaciones y practica. Editorial Alfaomega. Bogota – Colombia. 1997.
- [8] J.L. Marulanda, A. Zapata, and D. Meza, Fundamentos de la soldadura de metales. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007

Reportes Técnicos:

- [9] INDURA, Sistemas y materiales de soldadura, Indura. 1999.
- [10] SAGER S.A. Manual de soldadura, SAGER, Cali. 2004.
- [11] EUTECTIC – CASTOLIN, Manual de soldadura, Eutectic – Castolin, Bogotá 2002.

Documentos presentados en conferencias (No publicadas aún):

- [12] Notas del Diplomado en soldadura, Universidad Tecnológica de Pereira, Tecnología Mecánica, 2005.
- [13] GASQUE SILVA L. Las sustancias y los enlaces, Disponible en www.depa.pquim.unam.mx/qg/eq.htm.