



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO**

**“CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL
MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA EN TÉRMINOS DE AUTOMATIZACIÓN”**

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:
EDUARDO GARDUÑO**

**TUTOR
ARTURO BARBA PINGARRÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA**

MÉXICO, D. F. MAYO 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: MARCELO LÓPEZ PARRA
Secretario: VICENTE BORJA RAMÍREZ
Vocal: ARTURO BARBA PINGARRÓN
1 er. Suplente: VICTOR JAVIER GONZÁLEZ VILLELA
2 d o. Suplente: SAÚL DANIEL SANTILLAN GUTIÉRREZ

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL Y CENTRO DE
INGENIERÍA DE SUPERFICIES Y ACABADOS DEL POSGRADO DE
INGENIERÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

ARTURO BARBA PINGARRÓN

Agradecimientos

Deseo expresar mi más amplio agradecimiento al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por todo el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

Especialmente a mi director de tesis Dr. Arturo Barba Pingarrón y a mis sinodales Dr. Marcelo López Parra, Dr. Vicente Borja Ramírez, Dr. Saúl Santillán Gutiérrez y Dr. Víctor González Villela por sus consejos, sugerencias y todo el apoyo brindado.

El autor agradece al proyecto IT102612 "Desarrollo de Tecnologías de Modificación Superficial para la Optimización del Rendimiento de Materiales" de la DGAPA de la UNAM por su apoyo para la realización de esta tesis.

Agradezco a CONACYT por el apoyo brindado para terminar mis estudios de Doctorado, ya que gracias a esta ayuda pude continuar con mi formación académica, la cual está encaminada a contribuir al desarrollo de la investigación científica en el área de Ingeniería Mecánica.

Dedicatorias

Dedicó éste trabajo:

A mis padres,

Agradeciéndoles infinitamente su comprensión y amor, ya que sin ello no hubiese conseguido esta meta. Especialmente en memoria de mi madre María de la Cruz Garduño García quién creyó siempre en que lograría alcanzar este objetivo.

A mi esposa Claudia por todo su amor y paciencia

Esperando que éste trabajo la incentive para que se cumplan todos sus anhelos

A mis hijas Regina y Gabriela

Por el amor y alegría que me dan cada día, esperando que éste logro les sirva de aliciente para su desarrollo en todos los ámbitos de la vida.

A mis familiares,

Dándoles gracias por su apoyo incondicional e inapreciables consejos

En especial a mis suegros Manuel González e Sosa e Imelda Juana Muñoz por su cariño y por brindarme su apoyo a cada momento de mi vida.

A mis amigos,

Expresándoles mi inmensa gratitud por su amistad

En especial a la familia Ruiz Chávez que me han brindado todo su apoyo y me han fortalecido con sus consejos para seguir adelante.



Prólogo

PRÓLOGO

La Ingeniería de Superficies es una rama multidisciplinaria de la Ingeniería Mecánica, que permite optimizar las superficies expuestas las condiciones atmosféricas, con el objeto de prolongar significativamente su duración en servicio., así por ejemplo el desgaste es un fenómeno trascendental debido a la interacción existente entre los elementos mecánicos, debido a que reduce la eficiencia de las máquinas, provocando cambios dimensionales o daños superficiales y por ende incrementando el costo de operación. Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste. Por esta razón es muy importante poner atención al acabado superficial, propiedades físicas, mecánicas, estructura de la superficie y las condiciones que puedan cambiar o alterar las condiciones iniciales de las superficies en contacto.

Los recubrimientos son métodos tecnológicos para modificar la superficie de un material y lograr incrementar la resistencia al desgaste, la corrosión, la fatiga y la vida útil de los elementos de máquina, entre muchos otros fines. En lo referente al rociado térmico disminuye apreciablemente los costos de operación y no hay un notable calentamiento de las piezas. Si bien los recubrimientos obtenidos mediante rociado térmico cuentan con una gran gama de aplicaciones, aún no existen en la literatura alguna propuesta metodológica de procesos automatizados que permitan la calidad, repetibilidad de los recubrimientos logrados. Es por ello que se realizará este estudio proponiendo una metodología experimental detallada obteniendo datos experimentales utilizando simulaciones del proceso y aplicando diferentes técnicas para llevar a cabo el desarrollo del proceso de deposición.

La caracterización de los recubrimientos en este trabajo permitirá hacer un estudio comparativo de datos obtenidos mediante otros procesos por parte de empresas nivel mundial en este tema tales como Sulzer Metco.

También se enfocará este trabajo a determinar la resistencia al desgaste del recubrimiento depositado y obtener gráficas representativas de su comportamiento al desgaste (por medio de la razón de desgaste y de su pérdida



de peso). El análisis se efectuará en probetas de un acero de bajo contenido de carbono (AISI 1018), con el recubrimiento generado por proyección térmica automatizada. Dichas probetas se sometieron a desgaste con una prueba conocido como pin-on-disk, aplicando la norma G99 de la ASTM, en donde se aplicaron diferentes magnitudes de cargas y velocidades para estudiar su comportamiento al desgaste.

Además de hacer ensayos de desgaste del recubrimiento, también se analizará el comportamiento al desgaste del material base (AISI 1018) con las mismas variables de operación, para tener una base de comparación.

La simulación de los procesos de desgaste se debe hacer lo más cercano posible a la realidad, pues una de las aplicaciones de la tribología es precisamente observar el comportamiento de un material en condiciones de trabajo y poder analizarlo antes, y no después de que entre en operación, como muchas veces se realiza.

El carácter principal que lleva el desarrollo de este trabajo es la de obtener los parámetros óptimos para la deposición de cualquier tipo de material en polvo sobre aceros, proponiendo una metodología de desarrollo experimental con el apoyo de diferentes herramientas tecnológicas como sistemas CAD-CAM-CAE, robots industriales, sistemas de control automático y técnicas de deposición de recubrimientos superficiales.

En comparación con el desarrollo de trabajos de estos temas en el mundo globalizado es importante recalcar que se trata de estar a la par en el desarrollo de estas aplicaciones.

En base a los elementos que se presentan y comentan en el desarrollo de este trabajo se pone de manifiesto la importancia de la experimentación realizada y los resultados obtenidos permiten reproducir de forma satisfactoria la deposición de los recubrimientos con la metodología propuesta.



OBJETIVOS

OBJETIVOS

Mediante un adecuado proceso de diseño y construcción, automatizar un equipo de proyección térmica y evaluar los efectos de este cambio en la calidad de los recubrimientos conseguidos.

Evaluar el diseño del sistema automatizado de proyección térmica mediante la generación de recubrimientos con la aleación (Cr-Ni-Fe-Si-B) sobre aceros de bajo contenido de carbono, caracterizándolos mediante ensayos de microdureza, y a través de técnicas de microscopía electrónica y microanálisis, así como ensayos de desgaste,

Generar, desarrollar y validar una metodología (que por el momento no existe), que pueda asegurar repetibilidad y calidad uniforme de recubrimientos generados por proyección térmica automatizada.

HIPÓTESIS

Es posible obtener recubrimientos superficiales con características similares de uniformidad y propiedades mecánicas sobre aceros de bajo contenido de carbono, por medio de la aplicación de técnicas automatizadas de proyección térmica.



INTRODUCCIÓN

Resumen

Resumen: En este trabajo se presenta el desarrollo experimental llevado a cabo para dotar de mejores propiedades superficiales a aceros de bajo contenido de carbono, especialmente en lo referente a la resistencia al desgaste de estos materiales, mediante la generación de un recubrimiento **(Ni-Cr-Fe-Si-B)** por medio de la técnica de rociado térmico. Se realizaron recubrimientos superficiales de rociado mediante un equipo automatizado de proyección térmica por flama montado sobre un brazo robot, lo que permitió la variación de parámetros de proyección y los recubrimientos obtenidos se han evaluado mediante ensayos de microdureza, y a través de técnicas de microscopía electrónica y microanálisis, así como con ensayos de desgaste adhesivo, tipo pin on disk, variando cargas, velocidades y distancias recorridas para obtener gráficas representativas, por medio, especialmente, de su pérdida de peso. Los recubrimientos obtenidos muestran una calidad uniforme y son más homogéneos que los obtenidos por técnicas manuales y, evidentemente, mejoran la resistencia a la desgaste sin afectar la microestructura del sustrato.

Abstract: This work contains a description of the development experimental for produces better superficial properties of carbon steel employing an automation process of flame thermal spray projection which produces a coating made up of different alloys resistant to wear and corrosion connected to a thermal spray equipment which was then mounted on an robotic arm, thus providing it the degree of movement necessary to carry out the flame thermal spray coating process.

Coatings obtained of **Ni-Cr-Fe-Si-B** were characterized employing microhardness and pin on disk wear tests and techniques of scanning electron microscopy and microanalysis. These technologies not modify the microstructure of base metal and are a valuable alternative to improve wear resistance.



INTRODUCCIÓN.

El desarrollo tecnológico ha traído como consecuencia el mejoramiento de los procesos de manufactura a escala global y con ello la mejora de las propiedades y comportamiento de los materiales.

La automatización continúa avanzando con rapidez y cada vez realiza de forma más eficiente el desarrollo de productos y procesos. Esto ha permitido la mejora en el aspecto económico de los países que lo incorporan al proceso productivo en los diferentes ámbitos de la manufactura, debido a que permite hacer más eficientes los procesos con un aumento de productividad con disminución de costos y tiempos.

La técnica planteada en este trabajo no es la excepción ya que se tiene por objetivo que la automatización del proceso de proyección térmica permita mejorar la deposición de recubrimientos sobre aceros permitiendo aplicarlo posteriormente a nivel industrial en la generación de nuevos productos reacondicionados con los recubrimientos obtenidos.

La proyección térmica forma parte de las técnicas de deposición superficial integradas en lo que se denomina Ingeniería de Superficies y es una tecnología empleada para obtener recubrimientos de diferentes materiales, comúnmente constituidos de materiales metálicos, cerámicos o una combinación de ambos, sobre una gran variedad de sustratos, lo que permite conseguir una sustancial mejora en propiedades tales como resistencia al desgaste y/o a la corrosión de piezas y componentes.

El proceso consiste, en primer lugar, en fundir los materiales con los que se desea recubrir, empleando una gran variedad de fuentes de energía. Las más comunes son la combustión generada por mezclas de gases como oxígeno y acetileno, en el interior de una pistola convenientemente diseñada. El material fundido es proyectado hacia la superficie a recubrir usando para ello una corriente de aire (u otros gases) para conseguir que las partículas fundidas viajen y se impacten contra la superficie del sustrato para ir generando así el recubrimiento. [1] [7].

Los recubrimientos obtenidos mediante el proceso convencional pueden ser porosos y discontinuos en su espesor, entre otros factores y parámetros que hacen que, en muchos casos, pueda ser de baja calidad el recubrimiento obtenido por procesos de proyección por flama, particularmente en lo relativo a su baja adherencia y a la presencia de elevada porosidad.

Es por ello que, con el apoyo de la automatización del proceso, se busca mejorar los parámetros de operación, para obtener recubrimientos con menos porosidad y con espesores más uniformes que los conseguidos por métodos convencionales.

Con ello se busca mejorar considerablemente las propiedades del recubrimiento, principalmente las de resistencia al desgaste, proporcionadas con la aleación **(Ni-**



Cr-Fe-Si-B) que ha dado resultados satisfactorios para este propósito y conseguir procesos más confiables.

Contenido de los capítulos:

En el capítulo 1 Nociones generales del proceso de proyección térmica. Se presentan las bases generales del proceso de proyección térmica, así como las diferentes técnicas y los parámetros de operación y algunos de los ejemplos de aplicación más comunes.

El capítulo 2 Estado del arte de proyección térmica. Trata sobre el desarrollo y estado actual de la proyección térmica, así como sus perspectivas presentes y futuras.

En el capítulo 3 Diseño y fabricación del equipo de proyección térmica automatizado. Se expone el diseño y la forma detallada de los elementos que componen el diseño del equipo de proyección térmica automatizado con sus especificaciones, así como ventajas y limitaciones de cada propuesta.

El capítulo 4 Banco de pruebas del equipo automatizado, estudia y detalla como se realizó el banco de pruebas para la puesta en marcha del equipo automatizado, dividiendo su estudio y desarrollo en dos partes, la mecánica y la electrónica.

En el capítulo 5 Generación de recubrimientos con el proceso de proyección térmica automatizado, se expone de forma detallada la metodología utilizada para la generación del recubrimiento superficial mediante la automatización del proceso de proyección térmica por flama.

En cuanto al capítulo 6. Desarrollo experimental, en él se presenta el desarrollo experimental llevado a cabo para evaluar las características más destacables del recubrimiento superficial obtenido, a través de ensayos de desgaste.

El capítulo 7 Presentación y discusión de resultados. Se describen y analizan los datos provenientes de los ensayos de desgaste y se ligan con sus respectivas micrografías y gráficas experimentales que permitieron establecer los criterios y ventajas del proceso automatizado.

El capítulo 8 presenta las conclusiones del trabajo desarrollado



RELEVANCIA DEL TRABAJO DE TESIS

En el presente trabajo se ha podido determinar, en base a experimentación y caracterización, la generación de recubrimientos con adecuada calidad y uniformes en su aspecto y comportamiento, en términos generales, mediante el sistema automatizado de proyección térmica, utilizando la aleación (Ni-Cr-Fe-Si-B) sobre aceros de bajo contenido de carbono. La caracterización, mediante la cual se valoraron estos resultados, se llevó a cabo mediante ensayos de microdureza, y a través de técnicas de microscopía electrónica y microanálisis, así como ensayos de desgaste.

En el desarrollo experimental se muestra la secuencia de pasos y estrategias a seguir, asociadas a una metodología de trabajo, que no había sido aplicada previamente para la mejora de esta clase de proceso, lo que permite dotar a los recubrimientos de una calidad uniforme y de características de homogeneidad, a aceros de bajo contenido de carbono por el proceso de proyección térmica por flama automatizado.

Gracias a la automatización y experimentación de las muestras obtenidas se ha logrado repetir y conseguir bajo las mismas condiciones de operación recubrimientos uniformes. Con ello se ha desarrollado una metodología que permite establecer los parámetros necesarios para poder obtener y generar recubrimientos superficiales por proyección térmica con características específicas, que ponen de manifiesto y muestran que el proceso automatizado mejora sustancialmente las condiciones de deposición por el control de los parámetros y variables que en el intervienen y es posible afirmar que también se cumplen dichas condiciones para la aplicación de recubrimientos utilizando otras técnica de proyección térmica.

Esto se logró al comparar experimentalmente diferentes muestras aplicando recubrimientos sobre aceros de bajo contenido de carbono con diferentes materiales y diferentes técnicas de proyección.

Se utilizó la metodología propuesta para ambos casos rociando aceros con la aleación de polvo (Ni-Cr-Fe-Si-B) de forma convencional y aplicando el rociado térmico con una aleación de acero inoxidable sobre aceros mediante la técnica de proyección térmica por deposición de alambre, observándose que, si se cumplen las condiciones propuestas en la metodología de este trabajo de investigación, se obtienen resultados equivalentes.

Se realizó la caracterización de las muestras para valorar los resultados obtenidos y se pudo observar que los recubrimientos son uniformes y que no hay desprendimiento de los mismos considerando la aplicación de forma convencional para ambas técnicas, lo que permite establecer que con el proceso automatizado



ambas técnicas de proyección tendrán mejores resultados con el control de los parámetros que intervienen en ambos procesos de proyección térmica.

Los resultados de la proyección mediante esta técnica de deposición con alambre se presentan en el apéndice D de este trabajo de tesis.

En este apartado se afirma el cumplimiento de la metodología propuesta basándose en los resultados obtenidos, producto de la caracterización de las muestras mediante la medición de rugosidad, espesor de recubrimiento, análisis por microscopía electrónica y análisis químico. Esos resultados dejan claramente establecidos que el proceso de proyección térmica por flama, aplicando la metodología propuesta para la generación de recubrimientos, utilizando dos diferentes técnicas de proyección para la deposición sobre los mismos sustratos a través de proyección con polvo y proyección con alambre se conservan y cumplen las mismas condiciones para la obtención del recubrimiento superficial.

Esta última técnica cumple con los parámetros establecidos en el desarrollo de este trabajo y se presentan los elementos que constatan que aplicando la metodología propuesta, es viable determinar las condiciones para obtener recubrimientos de diferentes aleaciones sobre aceros u otro tipo de superficies tal como lo muestran las figuras del apéndice D.

Es por ello que se puede establecer que en este trabajo de tesis se logró determinar los parámetros y variables que involucran el proceso de proyección térmica para llevar a cabo la deposición eficiente de recubrimientos sobre aceros de bajo contenido de carbono, a través del empleo de un sistema automatizado y aplicando, de manera novedosa, para este tipo de procesos una metodología experimental, no empleada hasta ahora para tal propósito.

Los parámetros y variables determinados en el desarrollo experimental y que deben de ser la base para lograr una deposición son:

1. Morfología de la superficie y rugosidad
2. Tamaño de partícula
3. Distancia de proyección
4. Patrón de rociado
5. Velocidad de avance del brazo robot
6. Traslape de huella
7. Estrategia de rociado (trayectorias)
8. Temperaturas del proceso (tipo de aleación)



-
9. Presiones (tipo de aleación)
 10. Tratamiento posterior

Se ha podido reproducir los mismos resultados variando la superficie del sustrato y el equipo de proyección térmica con buenos resultados y se ha validado con la simulación del proceso mediante el uso de sistemas CAD-CAM para optimizar y verificar las trayectorias y velocidades de deposición del recubrimiento, además de optimizar mediante simulación y programación, los movimientos y trayectorias del brazo robot para la mejor distribución de las diferentes capas de rociado y alcanzar los espesores más uniformes posibles.

Lo anterior, finalmente, permite establecer condiciones específicas del rociado como son: el traslape de los splats o gotas y el tiempo de proceso, lo cual pone de manifiesto las bondades del proceso de proyección térmica automatizado, ya que facilita la obtención de recubrimientos mediante este medio de generación.

Resumiendo, como se ha mencionado anteriormente, los parámetros obtenidos permiten que se logren las mismas condiciones de deposición y cumplan su función al ser aplicados por el proceso automatizado.

También es importante destacar que estos resultados experimentales tienen singularidades y semejanzas con las tablas de parámetros que propone el fabricante del equipo de proyección térmica, Sulzer Metco³ para la operación de sus equipos de proyección, tomando en cuenta que es líder a nivel internacional en esta área de la Ingeniería de Superficies, lo que sirve de referencia y es un indicativo de que los resultados obtenidos y la metodología propuesta cumplen con sus parámetros de procesos convencionales y que el proceso automatizado mejora sustancialmente los recubrimientos debido al control de las variables y parámetros que intervienen en el proceso.

Esto pone de manifiesto la generación de conocimiento nuevo en esta área de la Ingeniería de Superficies, ya que se ha encontrado las condiciones para obtener y dotar de mejores propiedades los recubrimientos de proyección térmica por flama, que regularmente adolecen de diferentes problemas como son: la homogeneidad, uniformidad de espesor, porosidad y adherencia, lo cual limita significativamente los campos de aplicación. El proceso automatizado mejora sustancialmente estos problemas, lo cual permitirá en lo sucesivo desarrollar, generar e innovar nuevas aplicaciones de recubrimientos con diferentes aleaciones y sobre diferentes tipos de sustratos donde se requiera mejorar las propiedades en lo concerniente a la resistencia a la corrosión y al desgaste.



CONTENIDO

Capítulo 1 Nociones generales de proyección térmica.

1.1 Introducción al rociado térmico	3
1.2 Materiales usados para recubrimientos por rociado térmico.	4
1.3 Tratamientos previos al rociado térmico.	15
1.4 Técnicas de rociado térmico.	22
1.4 Ejemplos de aplicaciones de los recubrimientos obtenidos por el proceso de rociado térmico	35

Capítulo 2. . Estado del arte de proyección térmica

2.1 Introducción	37
2.2 Caracterización de polvos para uso como materia prima	39
2.3 Aplicación en la industria automotriz.....	43
2.4 Aplicación en recubrimientos biocompatibles	44
2.5 Aplicaciones de los recubrimientos obtenidos por proyección térmica	46

Capítulo 3. Diseño y fabricación del equipo de proyección térmica automatizado

3.1 Introducción	55
3.2 Identificación de la necesidad	57
3.3 Diseño conceptual	58
3.4 Funcionamiento básico del equipo	65
3.5 Diseño de detalle.....	67
3.6 Distintos tipos de modelado	68

Capítulo 4. Banco De Pruebas Del Equipo Automatizado

4.1 Introducción	78
4.2 Sistema de automatización (mecánica) del proceso de proyección térmica	78
4.3 Sistema de automatización (electrónica) del proceso de proyección térmica.....	83



Capítulo 5 Generación del recubrimiento con el rociado térmico automatizado.

5.1 Introducción	104
5.2 Procedimiento experimental.....	110
5.3 Huellas de proyección.	112
5.4 Banco de pruebas.....	112
5.5 Morfología superficial.	114
5.6 Calibración del equipo de automatizado.....	119

Capítulo 6 Desarrollo experimental.

6.1 Introducción	120
6.2 Metodo de prueba "pin-on-disk"	120
6.3 Equipo utilizado para realizar los ensayos de desgaste.	121
6.4 Ensayo de desgaste	128
6.5 Evaluación de desgaste en las probetas.....	130

Capítulo 7 Presentación y discusión de resultados

7.1 Introducción	133
7.2 Descripción de la metodología.....	134
7.3 Aplicación del método	140
7.4 Ensayos de desgaste.....	145
7.5 Comparación de gráficas de desgaste relevantes	165
7.6 Aplicaciones a futuro.....	174

Capítulo 8 Conclusiones

Conclusiones	176
Apéndice A.....	179
Apéndice B.....	186
Apéndice C.....	192
Apéndice D	195
Bibliografía.....	276



CAPÍTULO I

Nociones generales de la proyección térmica.

1.1 INTRODUCCIÓN AL ROCIADO TÉRMICO

En el año 1900, Max Ulrich Schoop, de Zurich, Suiza experimento con la pulverización de los metales plomo y zinc para revestimientos protectores. En 1909, obtuvo una patente que contempla el uso de un proceso de combustión (combustible y oxígeno) para fundir alambre y dirigirlo a un sustrato.

A pocos años de haberse cumplido un siglo de su descubrimiento (1902, M. U. Schoop)¹, la proyección térmica se sigue conceptualizando cómo en sus orígenes: un líquido (Material fundido debido a una fuente de calor) que es proyectado a altas presiones como un rocío, sobre una superficie preparada, constituyendo una nueva capa.

Los recubrimientos obtenidos por proyección térmica tienen un gran campo de aplicaciones, por ejemplo: prevenir la corrosión a altas temperaturas, reconstruir y aprovechar componentes desgastados, minimizar el desgaste, proveer de características eléctricas específicas (como la conducción) a un material, pueden utilizarse como barreras térmicas, entre otras muy variadas y extensas aplicaciones.

Aún no existe una bibliografía extensa que estudie las propiedades tribológicas de estos recubrimientos. Y, generalizando, existe un importante vacío en el estudio de las propiedades mecánicas para los recubrimientos obtenidos por proyección térmica.

Dada la propia naturaleza de este tipo de recubrimientos y sus espesores, hace que sus propiedades mecánicas sean difíciles de determinar. Además la remoción del recubrimiento, sin utilizar métodos químicos que podrían dañar el recubrimiento, es relativamente difícil, por lo que se dificulta adicionalmente dicha evaluación. La determinación de propiedades mecánicas es útil a la hora de comparar las condiciones de proyección y permite seleccionar mejor un recubrimiento para una aplicación concreta.

Los procesos de rociado térmico por su aplicabilidad y versatilidad han tenido un notable desarrollo en las últimas décadas que van desde los métodos desarrollados en los años 60 hasta el atomizado del arco según tecnología de los años 90's con el cual, la adherencia de la capa metalizada es varios órdenes de magnitud superior respecto a los métodos anteriores, además disminuye apreciablemente los costos de operación y no hay un apreciable calentamiento de las piezas, entre sus ventajas principales. Si bien este método de metalización está siendo usado con éxito en la industria, aún no se tiene una completa comprensión de los procesos metalúrgicos que tienen lugar



durante el rociado térmico del arco para los metales de soporte a los que se le aplica el recubrimiento, debido básicamente a que éstos se forman por la unión partícula – partícula del metal aportado, resultando en una capa superficial cuya estructura es altamente anisotrópica, y la valoración de sus propiedades físicas y mecánicas resulta complejo. Además, una variación de los parámetros tecnológicos del rociado térmico afectan factores del recubrimiento tales como: el tamaño y distribución de la porosidad, contenidos de óxidos, tensiones residuales, agrietamientos a escalas tanto macro como microscópicas, los cuales tienen una incidencia directa en la durabilidad y calidad de los recubrimientos por metalización.

1.2 MATERIALES USADOS PARA RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO.

Los materiales usados para recubrimiento por rociado son principalmente los polvos, barras y alambres. Metales o aleaciones son usados solamente para los procesos de rociado por arco(AS) y rociado por flama (FS- alambre)

Los cerámicos también son aplicados por proyección térmica, el proceso fue patentado en 1980, pero su uso es mucho menos extenso que el de los polvos.

La razón es la corta duración del sinterizado de las barras, la cual es rociada en unos pocos minutos; para continuar el proceso de deposición hay que introducir una nueva barra en la pistola de proyección.

La inevitable interrupción del proceso lleva a cambios microestructurales en la vecindad donde el rociado está siendo iniciado y reiniciado, está es la razón por la cual el uso de éste proceso debe evitarse en la deposición de superficies de piezas largas

También existen otros materiales para recubrimiento mediante rociado térmico como son cintas y recubrimientos mediante selladores (epóxicos o resinas de silicona).

La manufactura y el procesamiento de los materiales comúnmente utilizados en el proceso de recubrimiento por rociado térmico serán descritos en la siguiente sección.

Una buena selección del material a proyectar, así como su proceso de manufactura influyen directamente en la calidad y el costo del recubrimiento. Esto principalmente en los polvos, puesto que es importante tomar en cuenta su composición química y tamaño de partícula, entre otras características.

Existen materiales para el rociado térmico con especificaciones muy similares, por ello se deben tomar en cuenta varios factores para su selección:

- Es importante diferenciar sustancialmente las características para el rociado térmico de cada material (diferente deposición ,eficiencias , rangos de rociado)
- Tomar en cuenta las diferencias de precio.
- Hacer un balance entre “materiales aceptables vs. recubrimientos inaceptables”

¹ Lech Pawloski. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. British Library Catalog. England,1995



En los materiales manufacturados de diferente forma pero nominalmente con la misma composición y forma (ya sea polvo, barra o alambre), se debe hacer énfasis en mostrar las diferencias del material, las propiedades físicas y su diferente desempeño; siempre que la deposición sea bajo condiciones idénticas.

1.2.1 Clasificación de acuerdo a la naturaleza química de los materiales usados en el proceso de rociado térmico.

Las diferentes categorías de materiales usados en el proceso de rociado térmico como son; los metales y sus aleaciones, cerámicos, materiales compuestos y los polímeros son usadas para diferentes campos de aplicación. La definición de cerámico debe tomarse en un amplio contexto y deben incluirse cerámicos clásicos como la alúmina, materiales de alta tecnología como la zirconia y materiales refractarios basados en carburos. Ejemplos

- **Metales y aleaciones:** Por ejemplo, aluminio, aluminio-zinc, cobre, molibdeno, aleaciones de níquel-aluminio, y níquel-cromo (NiCrAlY, Ni-Al)
- **Cerámicos:** Por ejemplo, Óxido de aluminio (Alúmina Al_2O_3), óxido de cromo (Cr_2O_3), Hidroxiapatita ($HA, 10 Ca \cdot [OH]_6 [PO_4]$), Óxido de titanio (TiO_2), zirconia, Carburo de tungsteno-Cobalto (WC-Co)
- **Polímeros:** Por ejemplo, Nylon, Poliéster, Polietileno, etc.
- **Intermetálicos:** Por ejemplo, NiAl, Ni_3Al , y $NiAl_3$
- **Compuestos:** Por ejemplo, aluminio/silicón/Poliéster, molibdeno-níquel-cromo-boro-silicón, níquel-grafito, y bentonita-NiCrAl

La combinación entre los metales y los cerámicos son llamados **cermets** y pueden ser clasificados como materiales compuestos.

Es importante señalar que las aplicaciones de los recubrimientos son consecuencia directa de las características esenciales del material proyectado y que este a su vez puede ser alimentado en varios estados físicos. Por ejemplo el aluminio, zinc, y aleaciones de aluminio-zinc son usadas para la protección de la corrosión, tal como lo demuestran diferentes trabajos que se han desarrollado para diferentes aplicaciones utilizando diferentes técnicas de proyección térmica como aplicación para implantes dentales, prótesis², etc. El carburo de tungsteno y aleaciones de cobalto son usados para aplicaciones de resistencia particularmente a altas temperaturas. Y desde los años 90's el uso de los polímeros en recubrimientos y compuestos se ha ido incrementando notablemente debido a su sensibilidad térmica.

² J. Fernández, J.M. Guilemany, M. Gaona.
CPT Centro de Proyección Térmica. Departamento de Ingeniería Química y Metalúrgica.

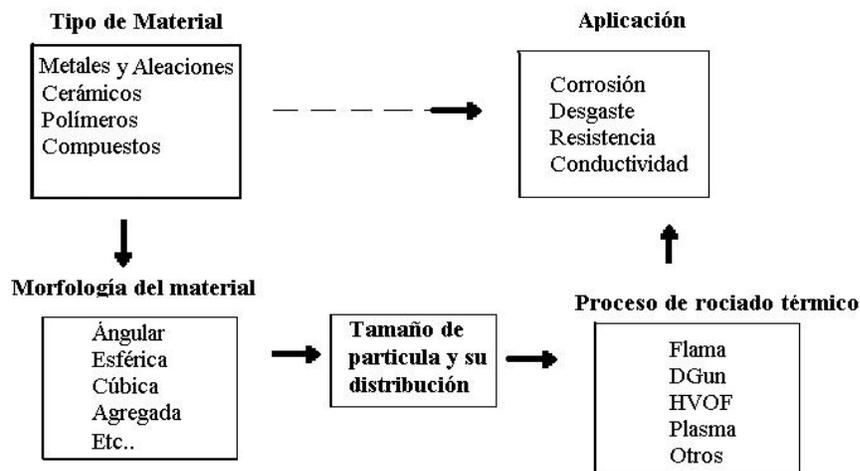


Figura 1.1 Relación entre el tipo de material y su posible aplicación.

La aplicación de un recubrimiento debe ser delimitada por sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. La adhesión del recubrimiento al sustrato es también importante, porque es crucial que el recubrimiento permanezca unido durante su tiempo de servicio.

El tamaño, distribución y la morfología de las partículas son características semejantes que deben diferenciarse plenamente en un material a proyectar, puesto que estas características no solamente influyen en los parámetros de rociado térmico sino también en el desempeño del recubrimiento.

Las consideraciones para el material a proyectar deben incluir sus métodos de manufactura. El proceso de producción de mayor interés es el de materiales en forma de polvo, ya que estos tienen una extensa diversidad y aplicación.

Los materiales proyectados en forma de barra y alambre si bien son muy aplicados en el proceso de rociado térmico, no serán mencionados en este trabajo debido a que su morfología no es altamente variable y sus métodos de producción no son particulares y exclusivos del proceso de rociado térmico.

1.2.2 Métodos para la producción de polvos

Los métodos industriales de fabricación de polvos dependen principalmente del tipo de material que se va a utilizar.

³ Sulzer metco 12C "Specifications" 1995.

- Los metales y aleaciones usualmente se preparan mediante alguno de los métodos de atomización y en otras ocasiones por sinterizado.
- Los óxidos y los cerámicos son manufacturados por fusión o sinterizado seguido por presión, pero también por métodos de calcinación.
- La caracterización de los polvos es un aspecto fundamental para las diferentes aplicaciones ya que la morfología de las partículas juega un papel importante y es determinante para la aplicación.³

1.2.2.1 Atomización

La atomización implica la conversión de un metal fundido en una nube de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos. Es el método más popular para producir polvos metálicos en la actualidad, y aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros.

1.2.2.1.1 Atomización con gas.

Hay muchas maneras de crear el rocío de metal fundido. Dos métodos se basan en la atomización con gas en los cuales se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido.

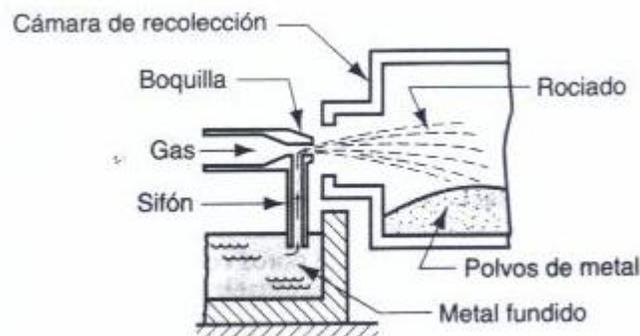


Figura 1.2 Atomización con gas⁴

El gas fluye a través de una boquilla de expansión, succionando el metal líquido de la fusión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotitas se solidifican en forma de polvo.

⁴Groover, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall 3a Edición, México, 2007.

En un método parecido, el metal fundido fluye a través de una boquilla y se atomiza inmediatamente por chorros de aire. Los polvos metálicos resultantes se recolectan en una cámara situada debajo.

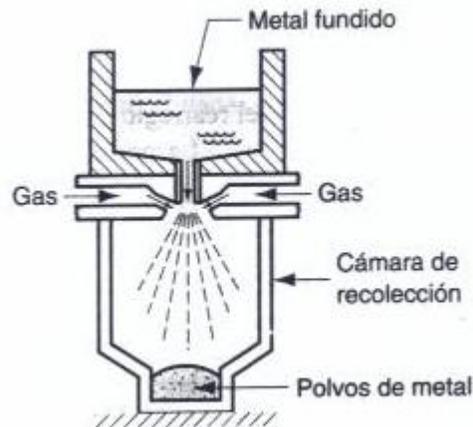


Figura 1.3 Atomización por aire⁴

1.2.2.1.2 Atomización con agua

Este método es similar al anterior, excepto que se utiliza una corriente de agua a alta velocidad en lugar de aire. Éste se conoce y es el más común de los métodos de atomizado, particularmente apropiado para metales que funden más allá de 1600 ° C. El enfriamiento es más rápido y la forma del polvo resultante es más irregular que esférica. La desventaja de usar agua es la oxidación en la superficie de las partículas. Una reciente innovación usa aceite sintético en lugar de agua para reducir la oxidación.

En ambos procesos de atomizado con aire o agua, el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente de fluido; el tamaño de partícula está en relación inversa con la velocidad.

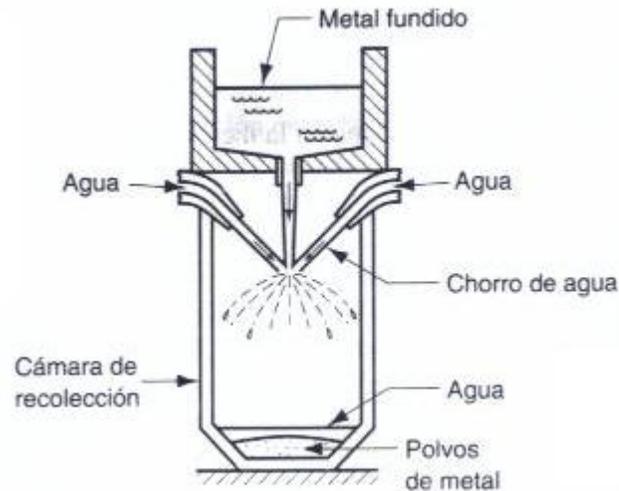


Figura 1.4 Atomización con agua.⁴

1.2.2.1.3 Atomizado centrífugo.

Varios métodos se basan en el método de disco rotatorio, donde se vacía una corriente de metal líquido en un disco que gira rápidamente y que rocía el metal en todas direcciones pulverizándolo.

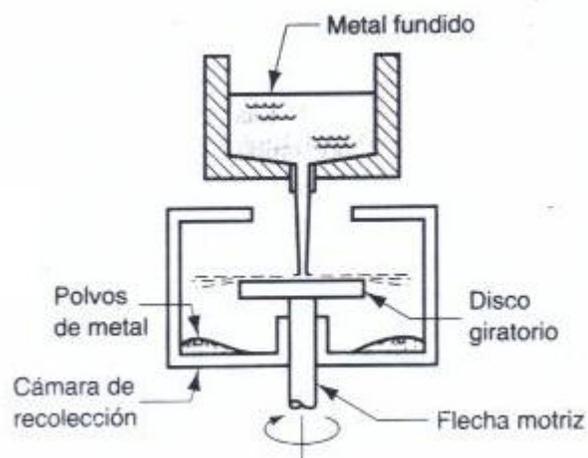


Figura 1.5 Atomizado centrífugo.⁴



1.2.2.2 Procesos de reducción química

1.2.2.2.1 Métodos de precipitación y electrólisis.

La reducción química comprende una serie de reacciones químicas que reducen los compuestos metálicos a polvos metálicos elementales. Un proceso común consiste en la liberación de los metales de sus óxidos mediante el uso de agentes reductores como hidrógeno o monóxido de carbono.

El agente reductor se produce para combinarlo con el oxígeno del compuesto y liberar el elemento metálico. Por este método se producen polvos de hierro, de tungsteno y de cobre. Otro proceso químico para polvos de hierro implica la descomposición del pentacarbonilo de hierro para producir partículas esféricas de alta pureza.

Otros procesos químicos incluyen la precipitación de elementos metálicos de sus sales disueltas en agua. Los polvos de cobre, níquel y cobalto se pueden producir por este método.

En la electrólisis se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrolito y se deposita en el cátodo, El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio.

1.2.2.2.2 Rociado en seco

Probablemente el método de fabricación de polvos más versátil es el rociado en seco que contiene pequeñas partículas de cierto material, que se mantienen unidas en un aglomerado esférico con unión o enlace orgánico. Los polvos preparados de esta forma pueden mejorar su densificación mediante el sinterizado. Algunas veces, para modificar la composición del polvo, las partículas preparadas por alguno de los métodos anteriormente mencionados son mezcladas.

1) combinación y mezclado de los polvos, el mezclado se refiere a la mezcla de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. La *combinación* se refiere a la mezcla de polvos de diferente composición química

2) compactación, en la cual se presan los polvos para obtener la forma deseada.

3) sinterizado, que implica calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión para provocar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la parte.



Estos tres pasos algunas veces se mencionan como operaciones primarias de la metalurgia de polvos. En ocasiones también se ejecutan operaciones secundarias destinadas a mejorar la precisión dimensional, incrementar la densidad y para otros propósitos.

- Operaciones secundarias
- Densificación y dimensionamiento
- Impregnación e infiltración
- Tratamiento térmico y acabado

1.2.2.3 Ejemplos de polvos comúnmente usados en la actualidad:

- Los metales y aleaciones (aleaciones auto fundentes. Ni, 16 wt. % Cr, 3.5wt. % Si, 4.5wt. % Fe, 1 wt. % C).
- Óxidos cerámicos (Al_2O_3).
- Mezclas cerámicas - metálicas (grafito revestido de Ni o WC aglomerado con 12 wt. % Co).
- Carburos ($Cr_{23}C_6$).
- Otros polvos por ejemplo, aleaciones aluminio - silicio aglomerado con 47 wt. % poliamida.

A continuación se muestran tablas donde se señalan qué polvos son fabricados y que tipo de proceso.

Polvo	Composición Química (wt. %)	Medio de Enfriamiento	Tamaño de Grano (μm)	Nombre comercial
Metales	Al Ni	Gas Gas	-48 +5	Amdry 3033 Valco 2120
Aleaciones	BAI. Ni 20 Cr BAI.Ni 15 Cr, 4.5 Si, 4Fe 3B	Agua Gas inerte		Amperit 250 CSM N60

Tabla 1.1. Polvos típicos producidos a partir del método de atomización³



Polvos	Composición Química (wt.%)	Método de producción	Tamaño de grano (μm)	Nombre comercial
Óxidos Óxido de cromo	99.5	Fusión y triturado		Amperit 704
	BAI. Cr_2O_3 , 5Si O ₂ , 3TiO ₂	Sinterizado y triturado	-120 +45	Metco 136 CP
Óxido de aluminio con de Óxido de titanio	BAI. Al_2O_3 , 3 TiO ₂	Fusión y triturado	-45 +22	Amdry 6204
Cementados Carburo de tungsteno con cobalto	BAI. WC, 12Co BAI. WC, 10Co	Fusión y sinterizado y triturado	-74 +45	Valco 5101 Al-1071
Carburos Carburos de cromo	Cr_2C_3	Fusión y triturado	-106 +30	Amdry 304

Tabla 1.2 Producción de polvos típicos usando la fusión (sinterizado) y triturado³

Polvo	Densificado	Composición Química (wt%)	Tamaño de grano	Nombre comercial
Metálico Molibdeno	Sinterizado	Mo		Amperit 102
Cerámicos Cromo- Silice		BAI. Cr_2O_3 , 5SiO ₂	-63+15	
Zircónia-ytria	Plasma RF	BAI. Zr O ₂ , 8 Y ₂ O ₃		Amdry 6610
Cementados Carburo de tungsteno con cobalto		BAI. WC 12Co		Valco 5104

Tabla 1.3 Polvos comúnmente utilizados en usando el aglomerado y densificación⁵⁵ J. Hernández, J. Arboleda Scientia et Technica Año XIII, No 36, Septiembre de 2007.



Polvo	Composición química (wt. %)	Tipo de recubrimiento	Tamaño de grano(μm)	Nombre comercial
Níquel aluminio	BAI. Ni, 4.5 Al	Poroso	-88 +45	Metco 450
Al 12Si con poliamida	BAI.AISi, 47 poliamida,	Poroso		Amdry
Ni- grafito	6 Enlace BAI. Ni, 40 Grafito	Denso		Amperit 2000

Tabla 1.4 Polvos típicos para revestimiento.³

1.2.2.4 Métodos de caracterización de polvos⁵

Los parámetros más importantes de los métodos de caracterización son: tamaño de grano, composición química de fases, forma, porosidad interna (correlacionada con densidad aparente) y grado de fluidez.

1.2.2.4.1 Características geométricas

La geometría de los polvos individuales se puede definir mediante los siguientes atributos 1) tamaño de grano y su distribución, 2) forma y estructura interna de las partículas y 3) superficial.

1.2.2.4.1.1 Tamaño de grano

El tamaño de las partículas se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Si la forma de la partícula es esférica, una sola dimensión es adecuada. Para otras formas, se necesitan dos o más dimensiones. Se dispone de varios métodos para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común usa cribas de diferentes tamaños de malla. Se usa el término número de malla para referirse al número de aberturas por pulgada lineal de la criba. Un número de malla 200 significa que hay 200 aberturas por pulgada lineal. Como la malla es cuadrada, la cuenta es la misma en ambas direcciones, y el número total de aberturas por pulg² es $200^2 = 40,000$. En consecuencia, un número alto de malla indica menor tamaño de partícula.

El análisis de tamaño de grano se puede realizar por medio de los siguientes métodos:

- Análisis mecánico por tamizado
- Rayos X
- Dispositivo para dispersión de rayos láser

Número de malla (ASTM)	Tamaño de grano (tamaño de tamiz) (μm)	Número de designación DIN	Tamaño de grano (μm)
100	150	0	-22.4 +5.6
120	125	1	-45 +22.4
140	106	2	-90 +45
200	74	3	-45 +5.6
230	63	4	-63 +16
325	44	5	-106 +32
400	37	6	-125 +45

Tabla 1.5 Equivalencias entre tamaños de mallas, números de normas ASTM: B214-86 y DIN 32529

1.2.2.4.1.2 Distribución de elementos

Las partículas aglomeradas o polvos para recubrimiento contienen diferentes fases (elementos) y pueden ser de importancia si están distribuidas de forma homogénea o no en la partícula (povos aglomerados) o si el recubrimiento cubre la superficie correctamente y en su totalidad. Para obtener esta información es necesaria la obtención de un estudio metalográfico de la sección transversal de las partículas de polvo. La distribución en 2D de los elementos se puede obtener mediante la dispersión de rayos X (espectroscopia) (WDS). Estas técnicas de análisis son opcionales para muchos microscopios electrónicos de barrido (SEM).

Las siguiente imagen muestra de las posibilidades y alcances de las técnicas de análisis por microscopia de SEM⁶.

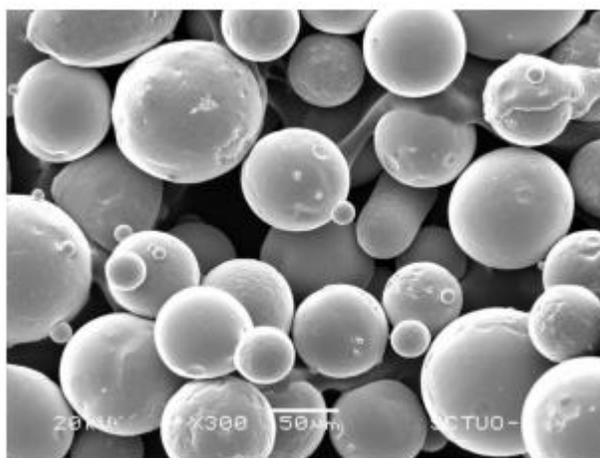


Figura 1.6. Micrografía SEM de los polvo aleación NiCrBSi.⁶

⁶ R. Vijande, J.M. Cuetos Revista de Metalurgia, 45 (2)



1.2.2.4.1.3 Morfología de los granos

La observación de la forma de los granos permite reconocer la técnica de fabricación. Para obtener información completa sobre la composición del polvo, es necesario observar los granos externos así como los internos. Lo anterior se puede hacer con especímenes preparados por encapsulado del polvo en resina y sucesivamente rectificado y pulido. Los especímenes pueden ser observados con un microscopio óptico.



Figura 1.6 Varias formas de partículas en metalurgia de polvos.⁴



Morfología externa		Morfología interna	
Granos	Técnica	Granos	Técnica
Esferas con superficie densa	Atomización por gas Aglomerado y densificado, Sol-gel Rociado-secado	Esferas sin poros	Gas Atomizador Sol-gel
Esferas con superficie rugosa	Atomización Agua	Esferas porosas	Aglomerado
Periferia irregular	Fusión y triturado Sinterizado y triturado	Esferas huecas	Aglomerado ó aglomerado y densificación
Bloque angular	Triturado Calcinación	Bloque angular denso	Fusión y triturado
		Bloque angular poroso	Sinterizado y triturado Calcinación
		Recubrimiento con revestimiento denso	Revestimiento denso
		Recubrimiento con revestimiento poroso	Revestimiento poroso

Tabla 1.6 Correlación entre morfologías internas y externas de grano y método de producción de polvos³

1.2.2.4.2 Otras características

1.2.2.4.2.1 Composición química y análisis de fases.

Los usuarios de polvos están interesados en especial en la siguiente información:

La composición química promedio de varias partículas, la distribución de elementos dentro de las partículas de polvo y fases cristalinas presentes en los polvos.



La composición química de los polvos se puede determinar con el uso de variadas técnicas analíticas. La más común es la llamada emisión de plasma por espectroscopia (ICPES) o la técnica de espectroscopia por fluorescencia de R-X.

El análisis de las fases presentes se puede conocer mediante difracción de rayos X. Los equipos modernos están computarizados y equipados con un catálogo de fases cristalinas, lo que facilita la identificación.

1.2.2.4.2.2 Densidad aparente y facilidad de flujo

Las mediciones de densidad aparente y fluidez están normalizadas por las normas ASTM B 329-76 y B 213-83, respectivamente. La medida de densidad consiste en un muestreo con pesos y volúmenes calibrados en un tazón (0.25 cm^3) y la medición de fluidez consiste en medir el tiempo necesario en que fluye una muestra de 50 gr. de una porción de polvo a través de una boquilla calibrada en un tubo de 2.54 mm. de diámetro.

1.3 TRATAMIENTOS PREVIOS AL ROCIADO TÉRMICO.

Para que un sistema de recubrimiento protector mediante el rociado térmico tenga éxito, es esencial una preparación adecuada de la superficie. Nunca se insistirá suficientemente sobre la importancia que tiene la eliminación del aceite, la grasa, los recubrimientos antiguos y los contaminantes superficiales (como restos de laminación y óxido en el acero)

El rendimiento de cualquier recubrimiento depende directamente de la preparación correcta y cuidadosa de la superficie antes de su aplicación. Si la preparación de la superficie es incorrecta o incompleta, incluso el sistema de protección más cara y tecnológicamente más avanzada, fracasará.

A continuación, se describen algunos de los distintos métodos de preparación de las superficies más comunes:

- Desengrasado (usando solventes orgánicos comunes, acetona o algunas veces vapor como desengrasante (especialmente para piezas grandes).
- Formado de la pieza (si es necesario), para ser posteriormente cubierta y luego rectificada hasta obtener la medida deseada.
- Mascarilla, previa a la preparación de superficies rugosas.
- Rugosidad, preparación de superficies que serán recubiertas.
- Mascarilla, previa al rociado térmico.



La mascarilla previa a la preparación de superficies rugosas se hace con el uso de diferentes tipos de mascarillas. Sólo el silicón o teflón se pueden usar como mascarilla para superficies rugosas o para ciertos procesos de recubrimientos por rociado térmico. Es importante cuidar que la temperatura de la superficie a tratar se mantenga constante si el rociado térmico es lento.

La mascarilla previa a la rugosidad es comúnmente hecha con telas, caucho o plástico.

La mascarilla previa al rociado térmico se hace con metales o cintas de fibra de vidrio, que se cortan a las dimensiones deseadas. También existen líquidos compuestos disponibles en el mercado, que previenen la adhesión de partículas calientes durante el rociado térmico y se pueden disolver con agua después del proceso. Los barrenos y las ranuras en la pieza rociada térmicamente se pueden proteger con teflón o insertos metálicos.

Las técnicas de preparación de superficie más comunes incluyen lo siguiente:

- **La macro rugosidad**, que consiste en cortar hilos en V o cortar ranuras en espiral. Esta técnica podría ser aplicada si el granallado no es recomendable para obtener una buena adherencia del recubrimiento en superficies grandes. En este caso la macro rugosidad es seguida de continuo granallado de acabado áspero.
- **Preparación de superficie rugosa por agentes químicos**, que no es muy frecuente en laboratorios externos debido a la incompatibilidad de fabricación en otros talleres. Usa rociadores para recubrir las piezas. Se ha recomendado un agente compuesto de una parte por volumen del 20% de ácido sulfúrico y tres partes por volumen del 10% de ácido nítrico para cada superficie de cobre a preparar antes del rociado. Los tiempos de preparación de la superficie rugosa por acción química son de 10 horas. Los aceros inoxidables pueden prepararse usando un agente de dos partes por volumen de ácido nítrico al 40% y tres partes por volumen de ácido clorhídrico al 20%. El tiempo del proceso debe de ser de 10 min.

1.3.1 Granallado.

El granallado es un método que sirve para la preparación de superficies removiendo todo tipo de revestimiento y contaminantes como puede ser pinturas viejas, laminillas, arenas de fundiciones etc. Simultáneamente a la remoción de contaminantes da perfil de rugosidad para mejorar tanto sea el aspecto visual de la pieza tratada como así también dar un anclaje a la superficie antes de aplicar el recubrimiento por medio de la técnica de rociado térmico.

La rugosidad que logra el granallado dependerá del tipo de abrasivo utilizado, así como de la dureza de la superficie a tratar permitiendo lograr rugosidades desde 5 micrones hasta más de 150 / 200 micrones.



El sistema, al dejar la superficie limpia y seca, elimina totalmente todo tiempo de secado, que se requiere para que un recubrimiento pueda ser aplicado.

Los tipos de abrasivos más usados son:

- Granalla de acero o hierro fundido
- Esferas metálicas
- Arenas cerámicas como sílice, alúmina o carburo de silicio



Figura 1.7 Proceso de granallado

Una línea más completa de abrasivos para granallado o arenado cubriendo las necesidades específicas es:

- Granalla de Acero al Carbono esférica y angular
- Granalla de Alambre Cortado
- Granalla de Alambre Cortado Redondeado
- Granalla de Acero inoxidable
- Granalla de aluminio
- Micro esfera de vidrio
- Óxido de aluminio
- Silicato de Aluminio
- Cuarzo
- Cáscara de nuez
- Abrasivos minerales
- Escoria de cobre

El tamaño del abrasivo depende tanto del espesor de la pieza a granallar como también del tipo de rugosidad para el área a granallar. Cabe mencionar que la arena sílice fina generalmente se usa para acabados finos y la alúmina para acabados burdos. Otro punto importante es la reducción del tamaño del abrasivo debido al proceso de granallado. El abrasivo debe ser cambiado con frecuencia dependiendo de



la presión, fuerza de impacto y de la dureza de las piezas a granallar. En la tabla 1.7 se muestran algunas propiedades de diferentes tipos de abrasivos para el granallado.

La obtención del óxido de aluminio abrasivo consiste en la fusión de la bauxita, triturada y calcinada y mezclada con un pequeño porcentaje de coque, hierro, además de Ti y MgO_2 . La fusión ocurre a una temperatura de $1900^\circ C$ a $2000^\circ C$ en un horno de inducción por un periodo de 36 horas, mientras que el enfriamiento puede ser de hasta una semana. El bloque formado es posteriormente fracturado y triturado.

El Óxido de Aluminio convencional (Al_2O_3). Este grano es extremadamente robusto y su forma de cuña permite una penetración rápida en materiales duros sin fracturarse o desgastarse excesivamente. Es usado en materiales de alta resistencia a la tracción como acero y sus aleaciones, hierro fundido nodular y maleable y también para materiales no ferrosos.

Abrasivo	Forma	Dureza (HRc)	Densidad (gr/cm³)	Presión Típica de trabajo (Kg/cm²)	Número de usos Recomendables	Tamaño (Malla)
Óxido de aluminio	angular	40-66	2.0	1.4 -6.3	3 - 5	12 - 325
Arena de acero	angular	40-66	230	1.4 -6.3	50 - 100	10 - 325
Garnet	angular	40	130	2.1 - 5.6	3 - 5	16 - 325

Tabla 1.7 Propiedades de algunos abrasivos.³

La preparación de las piezas rugosas debe hacerse con mucho cuidado. El granallado de acabado áspero puede crear esfuerzos en la superficie, en consecuencia, la pieza sufre deformación después del tratamiento. Debido a lo anterior se recomienda en muchas ocasiones el uso de abrasivo fino y baja presión. El abrasivo es alimentado a la boquilla por gravedad o por succión (ver figura 1.8). El aire que proviene del compresor (3) se introduce en la cámara (2), donde se descomprime. Al pasar el aire por la cámara, genera una presión de vacío que succiona el abrasivo (5) del contenedor (4) y lo transporta a través de la manguera (6) hasta la salida de la boquilla (1). Al salir por la boquilla ésta impacta al sustrato o pieza.

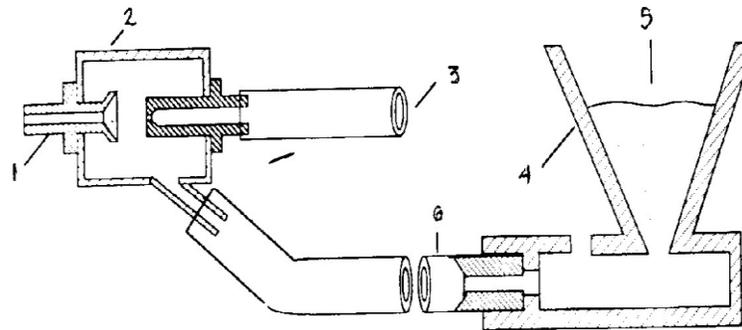


Figura 1.8 El sistema de succión de granalla; 1) Boquilla, 2) Cámara de descompresión, 3) Entrada de aire comprimido, 4) Contenedor de abrasivo, 5) Abrasivo, 6) Manguera.

1.3.1.1 Principales sistemas de granallado

Existe una alta gama de equipos para el granallado de todo tipo de piezas adaptándose a las más variadas necesidades de trabajo ya sea de grandes volúmenes como son granallado de barcos, granallado de tanques de petróleo, granallado de vagones de ferrocarril, o de pequeños tamaños como son granalladora de tornillos o granalladora de marcos de lentes.

Existe una infinidad de granalladoras desarrolladas en los últimos años para la industria metalúrgica, pero los más utilizados son las portátiles, las cabinas y los tipos cuartos.

Las granalladoras por turbinas centrífugas o por aire comprimido además de ser procesos económicos, rápidos y de simple operación, tienen la enorme ventaja de ser un circuito cerrado, por lo tanto evita la contaminación ambiental sin ningún riesgo para los operarios ni el medio ambiente.

1.3.1.1.1 Granalladoras de cinta rotativa

Las granalladoras de cinta rotativa son las más universales dentro de la familia de equipos de granallado ya que por su concepción permiten granallar piezas de distinto tamaño a granel.

En general los equipos de granallado de cinta rotativa van desde 20 y 60 litros de capacidad hasta los 130 a los 900 litros de capacidad de carga.

Los equipos de granallado de cinta rotativa son muy simples de operar. El trabajo comienza con la carga de las piezas sobre la cinta rotativa, pudiéndose realizar manualmente o por medio de un cargador de piezas.



Figura 1.9 Equipo de granallado de cinta rotativa

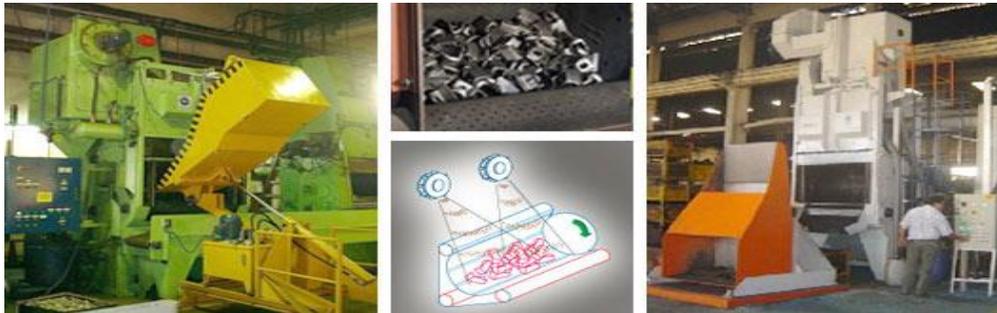


Figura 1.10 Granalladoras de Cinta Rotativa para cargar a granel

1.3.1.1.2 Granalladoras de tambor rotativo

Las granalladoras de tambor rotativo son utilizadas para el tratamiento de fundiciones donde se requiera en forma simultánea al granallado realizar un tamboreo que vaya desprendiendo rebabas que pudieran tener las piezas fundidas.



Figura 1.11 Granalladoras de tambor rotativo



Figura 1.12 Granalladora con sistema de succión que se utiliza en este trabajo.

Es recomendable que el granallado se haga en un área abierta ya que la acumulación de polvo en un espacio cerrado es peligroso para la salud. Sin embargo, para piezas grandes (como coronas o rollos de anilox), se usan boquillas dobles. Estas boquillas tienen dos salidas donde la primera boquilla expulsa el abrasivo y la segunda sirve como recuperador (ver figura 1.13).

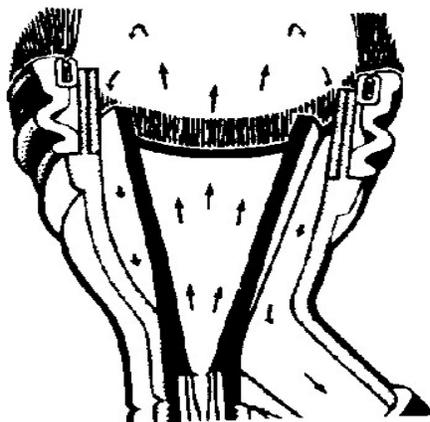


Figura 1.13 Esquema de una boquilla con recuperación de abrasivo en el granallado abierto.¹

Actualmente, los sistemas de granallado están automatizados para producción en serie. Los parámetros que intervienen en el granallado son entre otros: tiempo, presión y ángulo de granallado depositado en la superficie rugosa del sustrato. Algunos resultados obtenidos recientemente (Granallado de Inconel 718 con sistema de vacío y abrasivo de alúmina). El parámetro de la rugosidad de la superficie (R_a) máxima se obtuvo después de un corto tiempo de granallado. El granallado prolongado no genera necesariamente superficies más rugosas. De forma similar, el granallado

sólo permite ángulos menores a 90° para obtener una superficie rugosa en un corto tiempo. Finalmente, el Ra crece linealmente con el incremento de presión de granallado.

Los resultados de no adherencia son algunas veces contradictorios. Se han reportado adherencias para el aluminio rociado térmicamente en acero dulce con un máximo valor de 25 MPa si se usa abrasivo de alúmina aplicado con un ángulo menor de 25° . Pero una comparación directa de estos resultados no es posible debido a que los autores utilizaron diferentes parámetros en la investigación del ángulo de granallado (Wigren - Rugosidad, Apps - adherencia), debido a que el abrasivo de alúmina puede tener diferentes morfologías y las condiciones de aplicación no siempre son las mismas. La distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo no influye en la rugosidad de la superficie hasta un valor dado. La distancia de inicio (250 mm - Wigren) permite que la rugosidad disminuya. Finalmente, es importante mantener la rugosidad y proceso de granallado dentro de un intervalo de tiempo corto (no más de unas cuantas horas). Si el tiempo es muy largo, se presentará oxidación que puede afectar la adherencia y calidad del recubrimiento.

1.4 TÉCNICAS DE ROCIADO TÉRMICO.

1.4.1 Proceso de rociado Térmico

Los recubrimientos deben ser considerados como una solución de la ingeniería para proteger a las superficies contra el desgaste, corrosión, degradación térmica.

Un recubrimiento aceptable es generalmente caracterizado por una buena adhesión, compatibilidad con el sustrato y un bajo nivel de porosidad. La compatibilidad con el sustrato se refiere a tomar en cuenta las semejanzas físicas obligadas del material a proyectar con el sustrato, así como la temperatura y geometría.

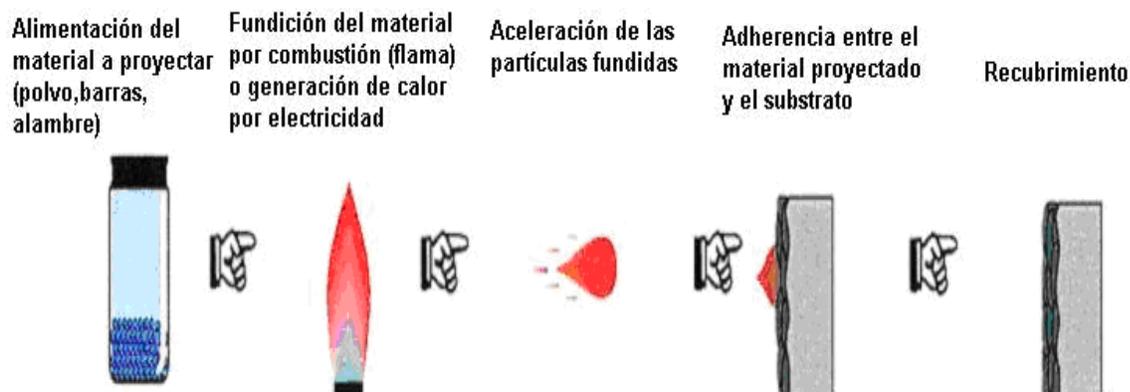


Figura 1.14 Generalidades del proceso de rociado térmico.⁷

Los aspectos claves del proceso de rociado térmico son ejemplificados en la siguiente ilustración donde se muestra como las partículas impactan una superficie preparada, construyendo una estructura laminar característica del rociado térmico.

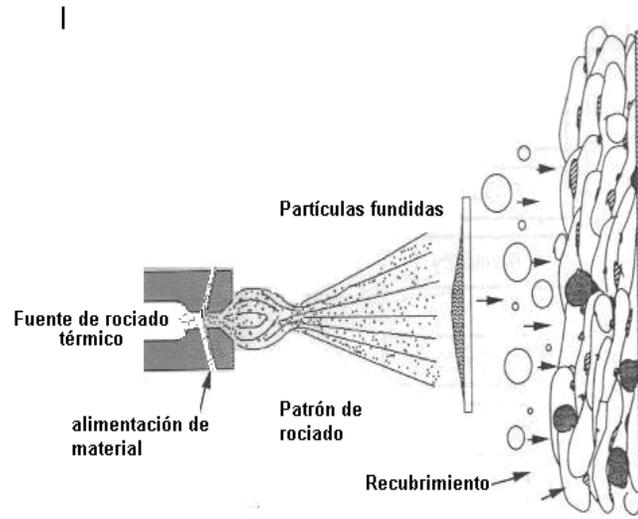


Figura 1.15 Proceso típico de rociado térmico.⁷

Las partículas o gotas aceleradas generalmente tienen una forma esférica y una vez que son impactadas con el sustrato se desparraman ocupando y llenando los espacios intersticiales del sustrato. El término usado para definir el impacto de una sola partícula proyectada contra el sustrato es **splat**. La estructura del splat forma un tamaño de grano menor a $5\mu\text{m}$ (0.0002 Pulg.). Además, en la mayoría de los procesos de rociado térmico se forma una composición homogénea, que es representativa del material proyectado.

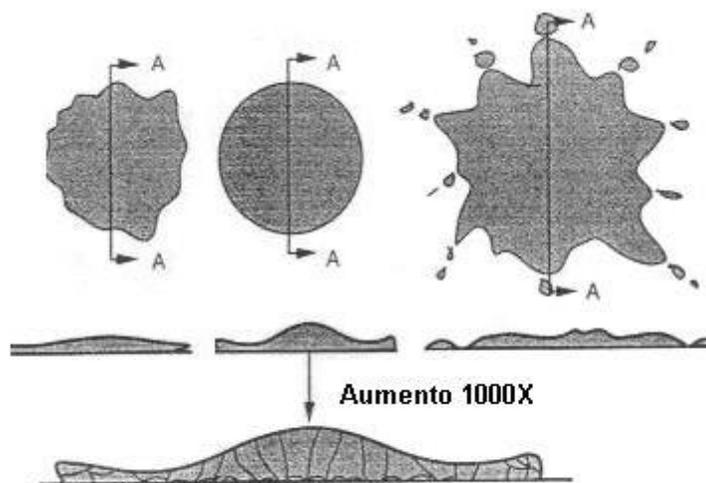


Figura 1.16 Estructuras típicas del Splat, producidos por el proceso de rociado térmico.⁷

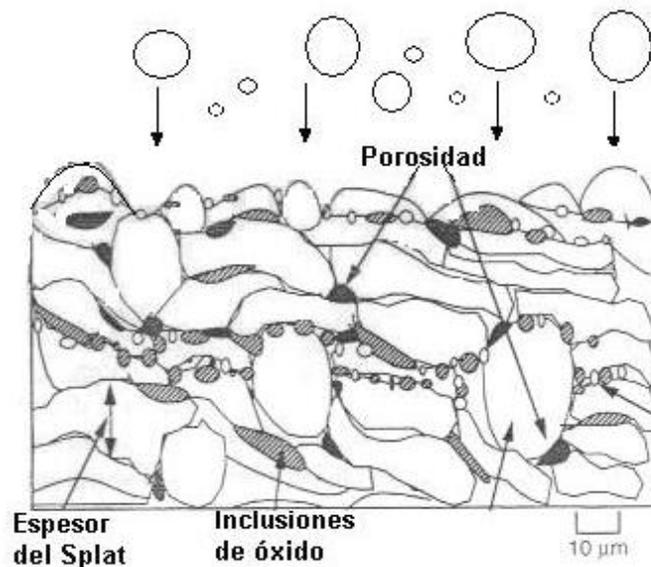


Figura 1.17 La figura muestra una microestructura de un recubrimiento por el proceso de rociado térmico, mostrando sus elementos comunes.⁷

1.4.2 Clasificación de las técnicas de rociado térmico.

Las técnicas de rociado térmico se clasifican dependiendo del tipo de combustible que utilizan. Existen dos grandes grupos; el de combustión (flama) y el de generación de calor por electricidad, además existe un grupo muy pequeño que maneja la energía cinética llamado rociado en frío.

La siguiente descripción de las técnicas de rociado térmico además del tipo de combustible utilizado también se basa en su popularidad en la industria. Es importante señalar que cada uno de estos procesos engloba a varios subprocesos con características propias de temperatura, entalpías y velocidades. Estos atributos y características en torno al desarrollo de su recubrimiento hacen único a cada proceso, en términos simples esto incluye durezas, porosidades, inclusiones (usualmente óxidos), y cohesión.

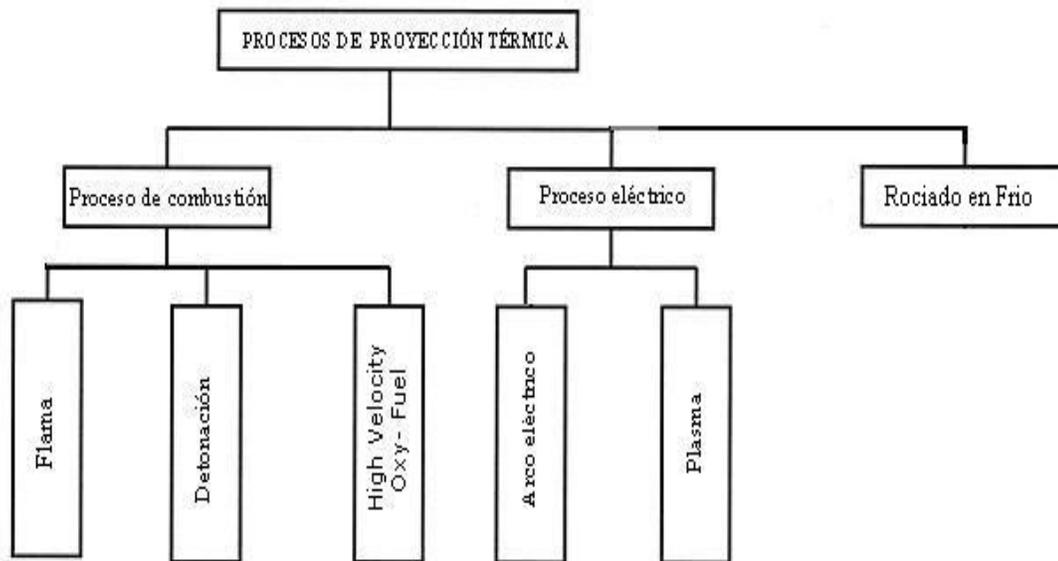


Figura 1.18 Clasificación de las técnicas de rociado térmico dependiendo del tipo de combustible que utilizan.⁷

1.4.2.1 Proceso de rociado térmico por flama

El proceso de proyección por flama fue utilizado por primera vez en 1902 por el ingeniero suizo M. U. Schoop. Este proceso es el más antiguo de todos.

Procesos de rociado térmico por flama:

- Por combustión de polvos
- Por combustión de alambre
- Por combustión de barras cerámicas

1.4.2.1.1 Proceso de Proyección térmica por flama por combustión de polvos

En este tipo de procesos se utilizan polvos metálicos como material de relleno, el cual se funde por medio de un proceso de combustión en los que se involucran diferentes gases los cuales son: el *oxígeno* como base el cual es utilizado como carburante y se



puede utilizar el *acetileno*, *nitrógeno* o *propano* como combustible, esto dependiendo del material a fundir.

El principio fundamental de este proceso es el de llevar a cabo la fundición del material en la punta de la pistola, en la cual el material fundido sale disparado con la ayuda de la inyección de aire comprimido, proyectando con ello el material sobre la superficie de trabajo, la cual es preparada previamente y por medio de la rugosidad del material base se logra que se adhiera a ésta de manera aleatoria y continua de tal forma que se crea una estructura coherente.

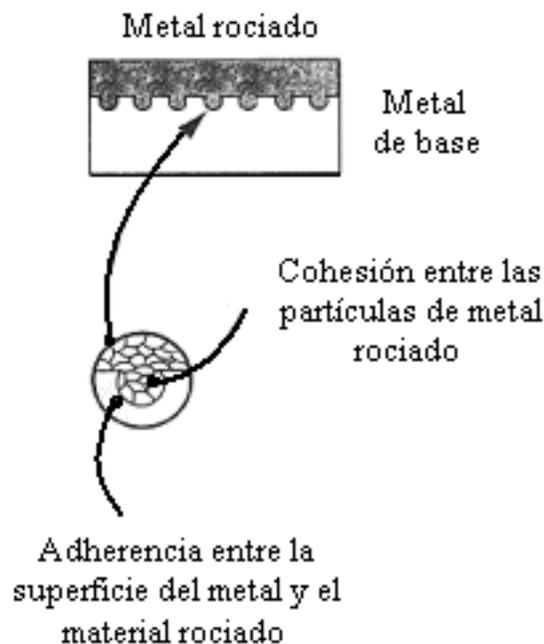


Figura 1.19 Liga de la superficie⁷

Con este proceso se pueden tratar los materiales a reparar con un punto de fusión por debajo de los 2,750° C (5000° F). Dentro de las piezas de trabajo se pueden reparar madera, plástico, así como otros materiales blandos y metales como el aluminio, ya que gracias a que las partículas de metal rociadas son transportadas por un flujo de aire, esto ayuda como un entorno refrigerante dando como resultado la no alteración de las características físico-térmicas de la pieza a renovar. En la figura 1.20 se muestra un diagrama básico de un equipo de proyección por flama y en la figura 1.21 se muestra la estructura principal de una pistola de proyección.

⁷ J.R Davis & Associates. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004

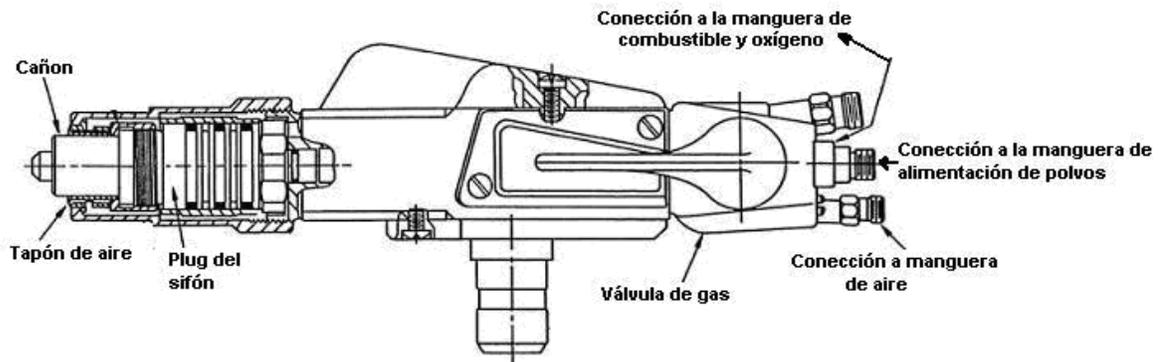


Figura 1.20 Diagrama de una pistola de rociado térmico por flama por combustión de polvos⁷

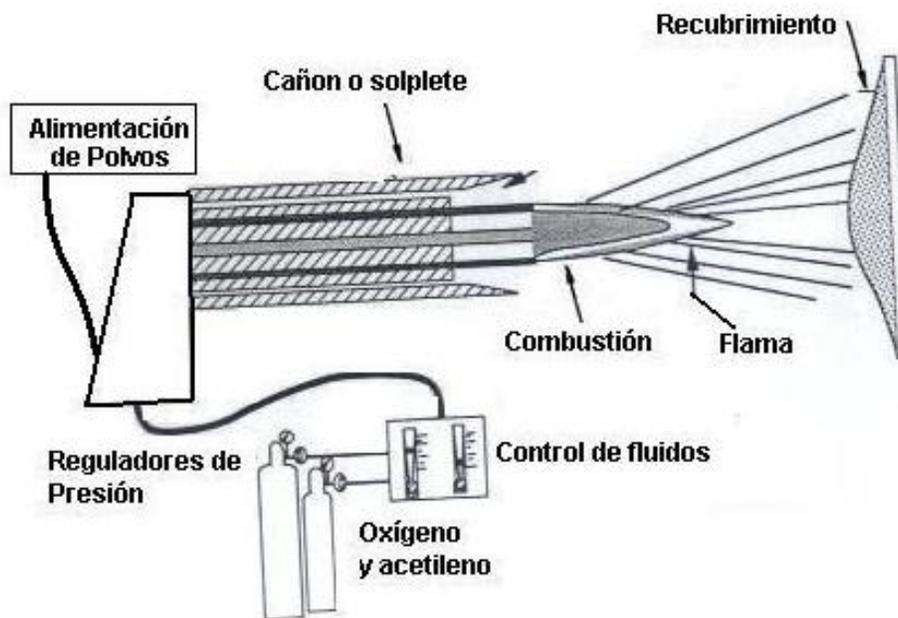


Figura 1.21 Esquema del rociado térmico por flama por combustión de polvos⁷



Este tipo de proceso es el más comúnmente utilizado en la industria, ya que es empleado en procesos específicos de manufactura minoritaria, dando como resultado bajos costos en la manutención y reparación de piezas de equipos.

1.4.2.1.2 Proceso de proyección de alambre por flama

En este proceso de proyección por flama en el cuál la alimentación está en forma del alambre o de la barra.

La pistola de proyección de alambre por flama no ha cambiado radicalmente desde los días de Schoop. Aunque ha habido cambios en el inyector y ventila el diseño del casquillo, el principio sigue siendo el mismo.

La flama es generada por la combustión de un gas (Por ejemplo acetileno) mezclado con oxígeno. La flama va fundiendo la punta del alambre o barra, y entonces es atomizada por un compresor de aire para formar pequeñas partículas o gotitas fundidas formando un rocío que es proyectado para formar a un adherente que "cubre".

La flama puede alcanzar una temperatura de 2,727-3,077 °C y una velocidad de 80-100 (m/s)

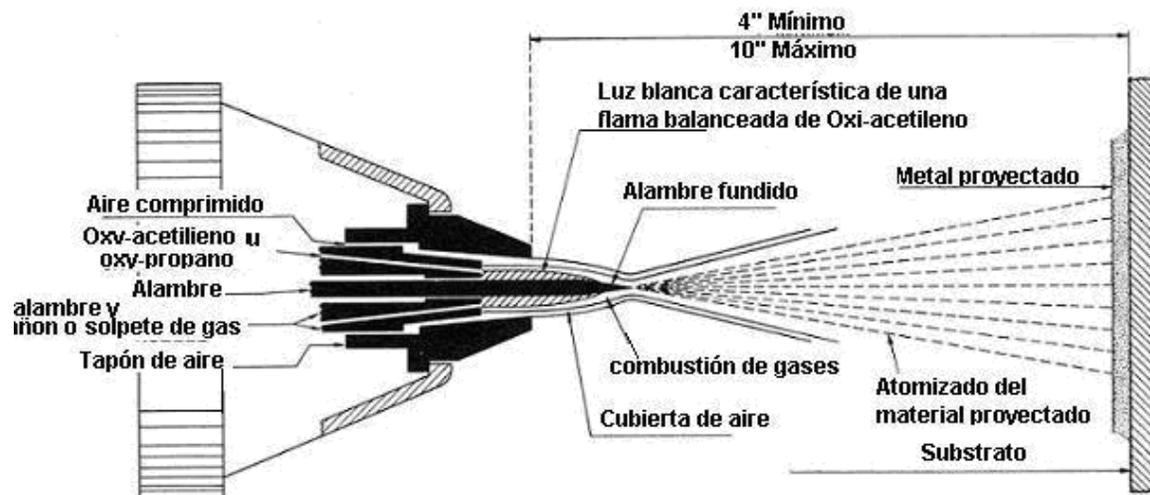


Figura1.22 Diagrama del rociado térmico de alambre / barra⁷

1.4.2.2 Detonación.

Tipo de material a proyectar: Polvo

El proceso de detonación y la pistola D-Gun fueron desarrollados en los años 50s. Fue en la antigua Unión Soviética en los años 60s donde este proceso tuvo un mayor crecimiento.

La pistola en D (D-Gun) consiste en un largo cañón de agua fría con un diámetro interior de 21-25mm y una longitud de 450-1350 mm.

En operación la mezcla de oxígeno y acetileno es introducido en el cañón junto con una carga de polvos con un tamaño de partícula entre los 5-60 μ m.

El gas es encendido y las ondas de la detonación aceleran los polvos por arriba de una velocidad de 750 m/s .Hay de 1-15 detonaciones por segundo, con purgas de Nitrógeno entre ellas.

Cada detonación deposita una capa densa y adherente. La repetición del ciclo produce capas más gruesas. Las capas de la detonación se diseñan para aplicar los materiales duros, especialmente carburos, en superficies expuestas a desgaste agresivo

Si se trabaja con la mezcla de acetileno con Oxígeno (D-Gun y Super D-Gun) o propano-butano con Oxígeno; la temperatura máxima es de 4,227 °C con el 45% de acetileno. La velocidad de las ondas de detonación alcanza los 2930 m/s y las partículas proyectadas los 750 m/s en una D-Gun y alrededor de 900 m/s en una super D-gun

La porosidad de un recubrimiento de WC-Co realizado por una D-Gun es de aproximadamente 0.5%.

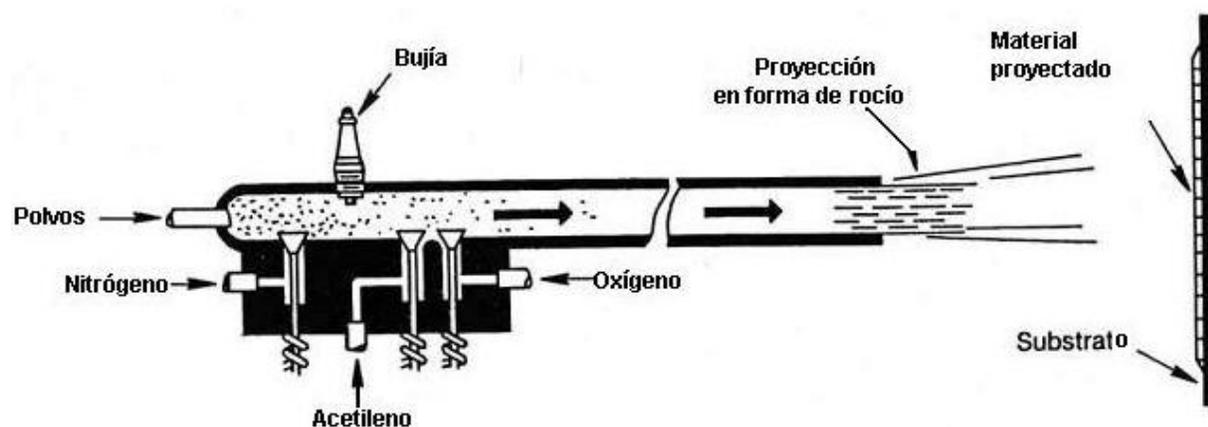


Figura 1.23 Pistola de detonación.⁷

1.4.2.3 Proceso de rociado térmico por HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)

Tipo de material a proyectar: Polvo

Este proceso fue inventado en 1958, pero no se hizo comercial hasta la década de los 80's. La técnica fue referida como Oxy-Combustible de alta velocidad (HVOF) y es un método único de rociar polvos del metal. El proceso de rociado térmico HVOF es similar en algunos aspectos al de detonación. Por ejemplo en los dos procesos se encierra una combustión interna extendida, con la diferencia que el proceso HVOF opera continuamente.

El proceso utiliza una combinación de oxígeno con varios gases combustibles incluyendo el hidrógeno, el propano, el propileno e incluso el keroseno. En la cámara de combustión, los subproductos ardientes se amplían y se expelen hacia fuera a través de del cañón de la pistola HVOF a velocidades muy altas. A la salida del cañón frecuentemente se producen partículas llamadas "diamantes" como se muestra en la figura 1.24.

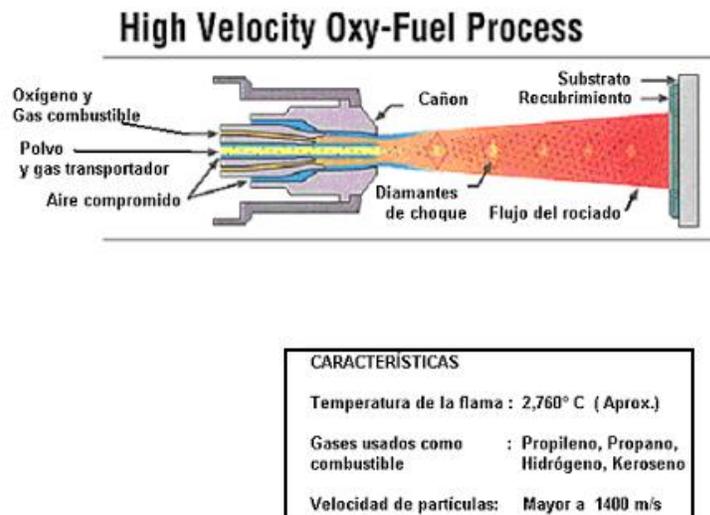


Figura 1.24 Pistola HVOF.⁷

Los polvos que se proyectarán vía HVOF se inyectan axialmente en los gases calientes que se amplían y proyectan contra una superficie para formar una capa. Las velocidades del gas que exceden el Mach 1, con temperaturas que se acercan a los 2300° C. Generalmente, el proceso de rociado térmico por HVOF es usado para deposiciones densas, usualmente de cermets como WC/Co o Cr₂C₃, además de MCrALY entre otros, para obtener recubrimientos muy duros.



Algunas propiedades del recubrimiento obtenidas por el proceso HVOF como la densidad, la adhesión y el contenido de óxido se comparan favorablemente con las obtenidas por el proceso de plasma. La adhesión obtenida generalmente supera la norma ASTM C 633 para adhesión y cohesión, la cual es limitada por una adhesividad aproximada de 83MPa. En cuanto a la porosidad usualmente se reportan valores menores al 1%. Las desventajas de este proceso incluyen índices bajos de deposición y la oxidación de partículas durante la proyección. Los esfuerzos futuros se centrarán en la aplicación de capas gruesas y de mejoras en control de procesos incluyendo el tiempo de proyección y la exposición al oxígeno atmosférico.

Las desventajas incluyen índices bajos de la deposición y durante el vuelo la oxidación de partículas. Los esfuerzos futuros se centrarán en la aplicación de capas gruesas y de mejoras en control de procesos.

1.4.2.4 Proceso de rociado térmico por plasma.

El plasma es una nube gaseosa ionizada integrada por electrones libres, iones positivos y átomos neutrales. Debido a sus características únicas es comúnmente llamado como "el cuarto estado de la materia". El plasma es producido por la transferencia de energía dentro de un gas hasta que el nivel de energía sea suficiente para ionizar el gas, dejando que los electrones y los iones actúen independientemente uno del otro.

El plasma se puede concebir como el movimiento de electrones libres a través de un gas ionizado.

Se estima que aproximadamente el 98% del universo visible se encuentra en forma de plasma. Y en la Tierra, el plasma natural ocurre en fenómenos como, la aurora boreal, la aurora australiana y el fuego de san Elmo. Los plasmas comunes manipulados por el hombre son por ejemplo, las lámparas neón y focos fluorescentes.

Los tipos de plasma considerados en este tema son menos comunes, y son parte de una clase llamada "plasmas térmicos". Se obtienen calentando un gas a altas temperaturas por ejemplo, 5000° C, sus átomos experimentan movimientos al azar muy violentos. Esto da lugar a las colisiones atómicas que hacen algunos electrones (de muy baja masa) llegan a ser separados de sus núcleos debido al choque con la población de iones (partículas de mayor masa); Cuando un gas experimenta esta interrupción resulta ionizado positivamente y la nube que surge se identifica como plasma.

Las fuentes de energía utilizadas por los dispositivos para rociado térmico por plasma usualmente son CD, arcos eléctricos, o RF .Además algunos plasmas térmicos pueden ser generados usando microondas, radiaciones gamma, y arcos eléctricos de corriente alterna. Los gases típicamente usados incluyen el argón, el nitrógeno, el hidrógeno y el helio. Pueden ser utilizados solos o combinados: argón-hidrógeno, argón-helio, nitrógeno-hidrógeno, etc.



En la actualidad se han desarrollado diversos procesos de rociado térmico usando plasma, por ejemplo:

- Proyección por arco de plasma.
- Proyección de plasma RF (radiofrecuencia).
- Proyección de plasma por atmósfera controlada (CAPS)
- Plasma de alta energía (HEP)
- Proyección de plasma bajo el agua
- Proyección de plasma a baja presión o proyección de plasma al vacío (VPS)
- Etc...

Para fines de este trabajo sólo mencionaremos algunas generalidades de los primeros dos procesos

1.4.2.3.1 Proceso de rociado térmico por arco de plasma.

Tipo de material a proyectar: Polvo

Este concepto fue desarrollado por H. Gerdien⁶ en Alemania en los años 1920s. Sin embargo, en aquel momento produjo poco interés pues no había alguna evidente necesidad de temperaturas tan altas. Así que fue hasta los años 50's cuando estos sistemas fueron nuevamente introducidos.

Las pistolas de proyección de plasma de la actualidad son suficientemente eficaces para producir temperaturas de 5,000° C a 16,000° C por períodos largos de tiempo. A los generadores del plasma por arco se les denomina como pistolas de proyección térmica por nanotransferencia.

El generador es esencialmente un arco voltaico que trabaja en un espacio estrecho. Dos electrodos, delantero (ánodo) y posterior (cátodo), se contienen en un pequeño compartimiento, la diferencia de potencial causa que los electrones sean extraídos del cátodo y acelerados hacia el ánodo. Al insertar un gas en un boquete entre los dos electrodos, los átomos de este gas comienzan a chocar con los electrones que sobrevienen y con ellos mismos, haciendo un flujo mayor de electrones proyectados hacia el ánodo, mientras tanto los núcleos expulsados de sus electrones se cargan positivamente y se mueven hacia el cátodo. De tal manera el gas contenido en el boquete se ha ionizado, llegando a ser eléctricamente conductor y formando un arco de plasma; el cual sale a través de un orificio en el ánodo como corriente de plasma, a una temperatura que excede los 9000° C. Esta fuente derrita el material a proyectar y lo propulsa hacia el substrato formando una capa de recubrimiento.

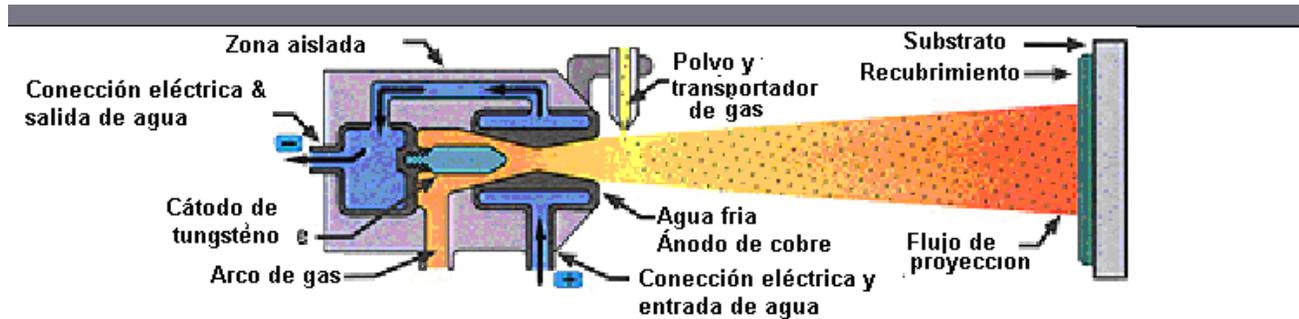


Figura 1.25 Proceso de rociado térmico por arco de plasma.⁷

Características del proceso:

Temperatura de la flama: Aprox. 6000 – 11,100 °C

Gases usados: Ar/H₂, N₂/H₂

Velocidad de las partículas: 240-550 m/s

El recubrimiento obtenido tiene un espesor de 150 a 500 μm. Y una porosidad mucho menor al 1%, siendo muy cuidadosos con los parámetros de deposición se puede lograr recubrimientos libres de porosidad.

1.4.2.3.2 Rociado térmico por plasma RF

Tipo de material a proyectar: Polvo

Proyección térmica por plasma de radiofrecuencia (RF), es un sistema que se hizo comercial a finales de la década de los 80's. En este proceso se tiene una bobina de alta frecuencia de inducción, refrigerada por agua y rodeada por una corriente de gas.

En la ignición una carga conductora se produce dentro de la bobina de inducción, que se junta al gas, ionizándola para producir un plasma. El polvo es alimentado por un tubo lleno de plasma de este modo se derrite y se proyecta hacia el sustrato.

Las capas producidas usando plasma del RF han demostrado para ser generalmente homogéneas y no porosas. Este método usa atmósferas neutras, y puede depositar los metales reactivos y tóxicos incluyendo el calcio, el uranio, el niobio y el titanio.

1.4.2.3.3 Rociado en frío (Cold Spray)

Este proceso fue desarrollado en un Instituto de Ciencias de la Antigua Unión Soviética a mediados de los 80's, pero ahora es comercializado en Europa y en EE.UU.

Al mencionar Rociado en frío su mismo nombre contradice el concepto de rociado térmico; De cualquier manera este método está siendo de mucho interés en los últimos años. Y se ha clasificado dentro de la larga familia de los procesos de rociado térmico.

El rociado en frío, es un proceso de proyección cinética que utiliza una propulsión supersónica de gas comprimido para acelerar partículas de polvo (de 1-50 μm de

diámetro) a muy altas velocidades que van de 500 a 1500 m/s. Cuando las partículas de polvo se impactan con el sustrato se deforman plásticamente y se unen a este formando un recubrimiento.

El mecanismo por el cual una partícula en estado sólido se deforma y adhiere al sustrato aún no está bien comprendido. La base del proceso de rociado en frío es la aceleración dinámica del gas, y por lo tanto, la energía cinética de las partículas proyectadas produce una deformación y la fusión plástica en estado sólido, cuando impactan con el sustrato para producir capas densas, sin que material proyectado sea significativamente calentado.

En el proceso de rociado en frío el gas (tales como helio o nitrógeno) es introducido en un módulo de control de gas. Después es presurizado y precalentado por una bobina y una resistencia eléctrica; para aumentar su velocidad. Las altas presiones del gas se obtienen al introducirse en inyectores Lavat (divergentes-convergentes). Entonces el gas se acelera a una velocidad sónica en la región del cañón, donde mezcla con el polvo a proyectar que usualmente se introduce por el lado de alta presión. Y el flujo entonces sale disparado a una velocidad supersónica en un rango de 2 a 4 Mach, para impactarse con el sustrato y formar un recubrimiento.

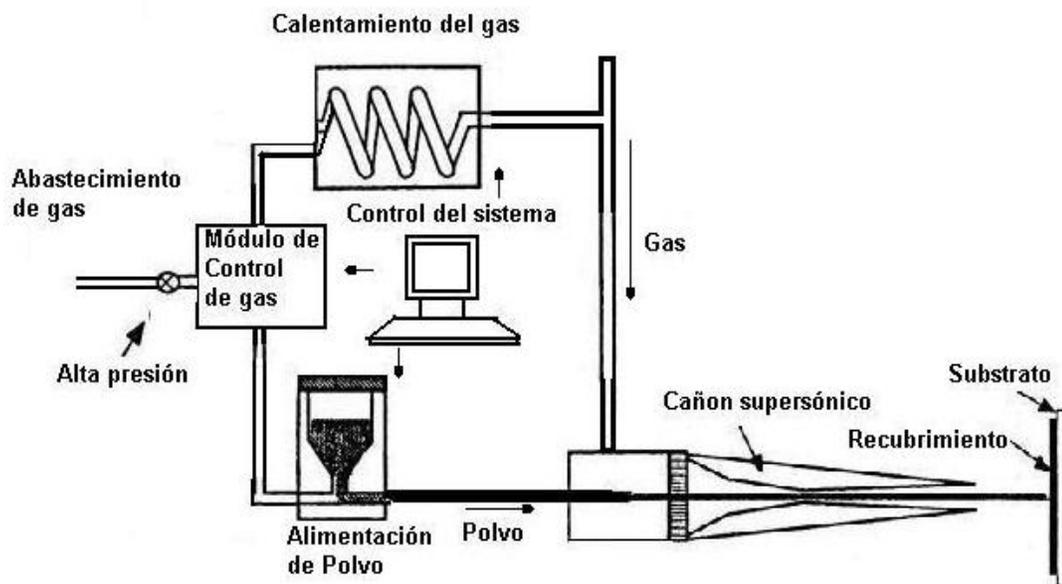


Figura 1.26 Diagrama esquemático de un proceso de Rociado en frío (Cold Spray).⁷

Rangos típicos de propulsión del gas para rociado en frío.

Presión de propulsión 1-3 MPa.

Temperatura en la propulsión: 0-700 °C

Consumo de Polvo: 2-8 Kg /h

Distancia de rociado: 10-50mm.

Potencia consumida para calentar el gas: 5-25 KW



Tamaño de partícula: 1-50 μm

Operando con gases como: aire, nitrógeno, helio y sus mezclas.

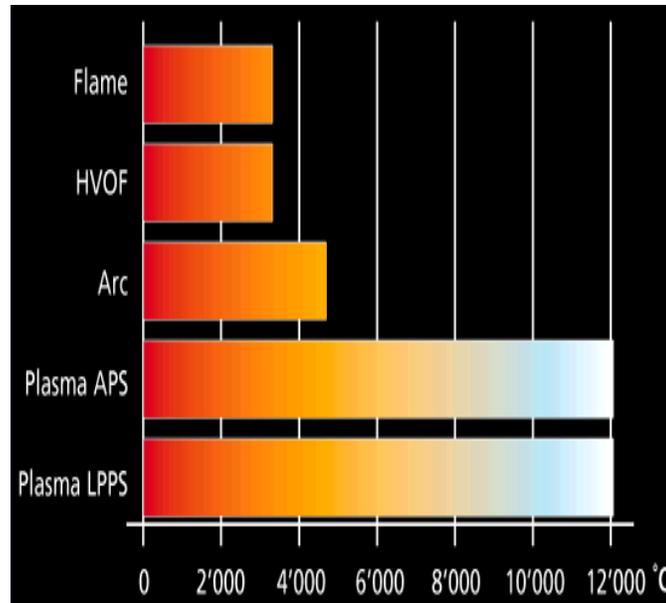


Figura 1.27 Comparación de los Procesos de Proyección Térmica respecto a la temperatura de operación

1.4 EJEMPLOS DE APLICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR EL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO

Históricamente los procesos de rociado térmico han sido usados como métodos de reparación, reconstrucción y reajuste de elementos de maquinaria, restaurando las dimensiones originales, así como para proveer de resistencia a la corrosión o resistencia al desgaste a metales usados en diferentes tipos de estructuras tales como puentes, etc.

En la actualidad los procesos de rociado térmico son usados en diversas industrias por ejemplo:

Uso del rociado térmico en la industria:

- Aeroespacial
- Agricultura
- Marítimo
- Metalurgia
- Fabricación de papel e impresión
- Bombas / motores
- Electrónica

¹⁴³www.sulzer.com



- Computadoras
- Productos petroquímicos
- Geotérmico
- Utilidades / energía / agua / aguas residuales
- Golf
- Militar
- Plataformas costa afuera del aceite
- Refinerías
- Ferrocarril
- Automóviles



CAPÍTULO II

Estado del arte de la proyección térmica

2.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente se han venido realizando diferentes investigaciones en lo concerniente a la proyección térmica y en especial al estudio de la influencia de la composición química y el tratamiento térmico posterior de probetas proyectadas por una gran diversidad de aleaciones metálicas, cerámicas y una combinación de ambas cerámico-metal (cermet), utilizando diferentes técnicas para su deposición.

Se han realizado estudios sobre la resistencia al desgaste de recubrimientos con características de composición similar como la que se utilizó en el presente trabajo la cual se ha denominado Aleación Estándar (AE), la cual está compuesta por NiCrBSiFe y la cual se proyectó utilizando la técnica de proyección térmica por flama.

En el ámbito mundial el líder en esta área de la Ingeniería de Superficies Sulzer Metco ha trabajado con esta tecnología implementando los equipos y desarrollo de materiales pero llevando a cabo el proceso de forma convencional obteniendo valores similares a los reportados en este trabajo de investigación en el cual se difiere principalmente en la forma de preparación de muestras y trayectorias de deposición, lo cual ha permitido que los recubrimientos obtenidos son de mayor espesor y uniformidad que los que presenta Sulzer en sus tablas de especificaciones que utiliza para la venta de equipos. Esto también lo establece un trabajo que fue presentado en el 2007 en la revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela en el cual se estudia la caracterización de un recubrimiento NiCrBSiWFe depositados por el proceso de rociado térmico de Alta Velocidad Oxígeno-Combustible (HVOF) realizado por Rodríguez, Moreno y Bilbao⁷.

En dicho trabajo obtienen resultados similares a los propuestos por Sulzer, aunque no proponen un procedimiento específico para la mejora de uniformidad, ni rangos de parámetros para deposiciones homogénea y espesores uniformes.

Estas afirmaciones también han sido constatadas en trabajos para el área automotriz realizados por Gérard Barbezat⁸ quien propone formas de aplicación sobre cilindros automotrices utilizando aleaciones similares difiriendo con las técnicas de proyección anterior ya que sus recubrimientos fueron realizados con equipo de proyección por plasma.

Estos trabajos difieren en algunos puntos como son la porosidad y uniformidad reportada por A. Yfantis, I. Paloumpa¹³ y A. J. Zhang, Y. Wang¹⁴, quienes reportan en sus trabajos gran porosidad, baja uniformidad y adherencia. Esto es un indicativo importante, ya que los diferentes trabajos reportados presentan similitudes pero adolecen de una metodología que permita mejorar los parámetros utilizados en la deposición, como es el caso que se propone en este trabajo de tesis, el cual propone



una metodología bien definida y secuencial para la generación de recubrimientos. Aunada a la aplicación del proceso automatizado ha permitido constatar en base a la caracterización de las muestras experimentadas que el proceso de deposición es válido para el proceso de deposición aplicado de forma convencional y automatizada, ya que se conservan las variables y parámetros propuestos en el proceso de proyección. Esto también fue posible constatarlo aplicando otras aleaciones y utilizando otra técnica para la generación de los recubrimientos.

Esto se logró al comparar experimentalmente diferentes muestras aplicando recubrimientos sobre aceros de bajo contenido de carbono con diferentes materiales y diferentes técnicas de proyección.

Se utilizó la metodología propuesta para ambos casos rociando aceros con la aleación de polvo (Ni-Cr-Fe-Si-B) de forma convencional y aplicando el rociado térmico con una aleación de acero inoxidable sobre aceros mediante la técnica de proyección térmica por deposición de alambre, observándose que, si se cumplen las condiciones propuestas en la metodología de este trabajo de investigación, se obtienen resultados equivalentes.

Se realizó la caracterización de las muestras para valorar los resultados obtenidos y se pudo observar que los recubrimientos son uniformes y que no hay desprendimiento de los mismos considerando la aplicación de forma convencional para ambas técnicas, lo que permite establecer que con el proceso automatizado ambas técnicas de proyección tendrán mejores resultados con el control de los parámetros que intervienen en ambos procesos de proyección térmica.

Los resultados de la proyección mediante esta técnica de deposición con alambre se presentan en el apéndice D de este trabajo de tesis.

En este apartado se afirma el cumplimiento de la metodología propuesta basándose en los resultados obtenidos, producto de la caracterización de las muestras mediante la medición de rugosidad, espesor de recubrimiento, análisis por microscopia electrónica y análisis químico. Esos resultados dejan claramente establecidos que el proceso de proyección térmica por flama, aplicando la metodología propuesta para la generación de recubrimientos, utilizando dos diferentes técnicas de proyección para la deposición sobre los mismos sustratos a través de proyección con polvo y proyección con alambre se conservan y cumplen las mismas condiciones para la obtención del recubrimiento superficial.

Esta última técnica cumple con los parámetros establecidos en el desarrollo de este trabajo y se presentan los elementos que constatan que aplicando la metodología propuesta, es viable determinar las condiciones para obtener recubrimientos de diferentes aleaciones sobre aceros u otro tipo de superficies tal como lo muestran las figuras del apéndice D.

Es por ello que se puede establecer que en este trabajo de tesis se logró determinar los parámetros y variables que involucran el proceso de proyección térmica para llevar a cabo la deposición eficiente de recubrimientos sobre aceros de bajo contenido de



carbono, a través del empleo de un sistema automatizado y aplicando, de manera novedosa, para este tipo de procesos una metodología experimental, no empleada hasta ahora para tal propósito.

Para ello se muestran en los siguientes apartados algunos de los trabajos de investigación en diferentes áreas de aplicación generando recubrimientos y en los cuales se trabaja alrededor de las variables y parámetros que son importantes en la deposición de recubrimientos y que guardan singularidades variando la técnica de proyección.

Los parámetros que son importantes en los procesos y que se ponen de manifiesto en el desarrollo de este trabajo de investigación son: Morfología de la superficie y rugosidad, tamaño de partícula, distancia de proyección, patrón de rociado, velocidad de avance del brazo robot o medio de desplazamiento, traslape de huella, estrategia de rociado (trayectorias), temperaturas del proceso (basado en el tipo de aleación a proyectar, presiones (basado en tipo de aleación a proyectar), tratamiento posterior.

Llevando a cabo este procedimiento es posible mejorar las propiedades del recubrimiento y tener un control más importante de los parámetros del proceso, sin importar sobre el tipo de sustrato, aleación a proyectar y la técnica utilizada en la proyección térmica. Esto reditúa significativamente en el área de aplicaciones de los recubrimientos atacando principalmente los problemas más importantes en el deterioro de los materiales como es la corrosión y el desgaste.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE POLVOS PARA USO COMO MATERIA PRIMA

Los esfuerzos realizados por la industria del rociado térmico para garantizar la calidad de los recubrimientos obtenidos con sus productos han llevado a la creación de catálogos técnicos que especifican las condiciones a las que debe ser depositado cada material, para obtener unas propiedades determinadas. Si bien es cierto que esto facilita el trabajo de los operarios, en algunos casos limita las posibilidades de aplicación y de obtención de un mejor desempeño para estos recubrimientos.

En este rubro se han realizado diferentes estudios para poder caracterizar las materias primas y la aplicación específica.

Se tiene un caso de estudio reportado por Hernández F. y Arboleda .⁵ en el cual se seleccionaron dos materiales de la casa comercial Eutectic -Castolin y se determinaron sus propiedades fisicoquímicas, para establecer el calor necesario para su fusión, posteriormente se depositaron mediante las antorchas Eutalloy Super jet y Terodyn 2000, aplicando con cada antorcha una cantidad de calor suficiente para su fusión, Finalmente, se evaluó la estructura y microdureza de cada uno de los recubrimientos obtenidos. Los resultados permitieron establecer que si se conoce claramente el material a depositar y se controlan adecuadamente los diferentes parámetros de aplicación, se pueden obtener recubrimientos similares con las antorchas utilizadas y cuyas propiedades pueden ser incluso mejores que las de los obtenidos en las condiciones establecidas por el fabricante.

Se realizó el análisis químico realizado mediante espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS) permitió determinar que los polvos corresponden a una mezcla de partículas de níquel (Ni), con carburos de tungsteno (WC) y trazas de cromo. En la figura 2.1 se muestra el espectro obtenido en este análisis.

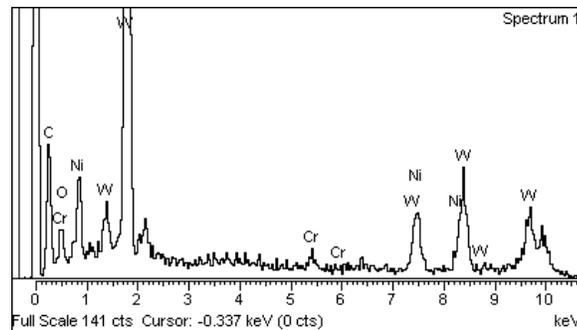


Figura 2.1 Espectro obtenido en el análisis EDS de la muestra de referencia⁽⁵⁾.

En la figura 2.2 se observa la morfología de los materiales de referencia utilizados para realizar el proceso de proyección térmica.

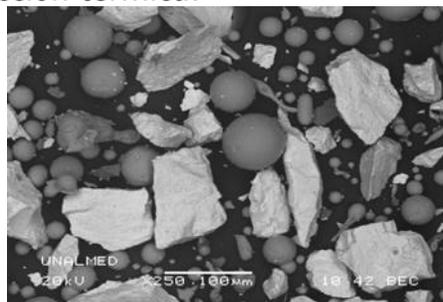


Figura 2.2 Imagen de MEB realizada a la muestra referencia⁽⁵⁾

Una vez conocidas las características químicas y morfológicas de las partículas, se determinaron sus propiedades fisicoquímicas y se calculó el calor requerido para su fusión. Los resultados se muestran en la tabla 2.1 y 2.2

⁵J. Hernández, J. Arboleda Scientia et Technica Año XIII, No 36, Septiembre



MATERIAL	DENSIDAD ⁽⁶⁾ (g/cm ³)	TAMAÑO DE PARTÍCULA (μm)	VOLÚMEN (cm ³)
Níquel	8.9	10.61	6.25*10 ⁻¹⁰
		73.79	2.1*10 ⁻⁷
Carburo de tungsteno	15.6	24.9	4.93*10 ⁻⁸
		91.6	2.14*10 ⁻⁷
Alúmina	3.96	30.75	1.96*10 ⁻⁹
		54	1.86*10 ⁻⁸
Óxido de titanio	4.0	23.12	9.73*10 ⁻¹⁰
		34.62	8.72*10 ⁻⁹

Tabla 2.1 Densidad, tamaño y volumen de cada partícula, requerida para el cálculo del calor de fusión⁽⁵⁾

MATERIAL	TEMPERATURA FUSIÓN ⁽⁶⁾ (°C)	C _r ⁽⁶⁾ (J/g-°C)	Q _r (J)
Níquel	1453	0.44	3.49*10 ⁻⁶
			1.17*10 ⁻⁷
Carburo de tungsteno	2780	0.48	1.01*10 ⁻⁷
			4.41*10 ⁻⁷
Alúmina	2072	0.85	1.35*10 ⁻⁷
			1.28*10 ⁻⁷
Óxido de titanio	1855	0.7	4.98*10 ⁻⁶
			4.46*10 ⁻⁷

Tabla 2.2. Temperatura de fusión, capacidad calorífica y calor de fusión de cada partícula⁽⁵⁾.

En base a estos parámetros se seleccionó el equipo y parámetros para la deposición como se muestra en la tabla 2.3

ANTORCHA	MATERIAL	CÓDIGO DE LA MUESTRA	FLUJO DE GASES ($10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$)	
			O ₂	C ₂ H ₂
Eutalloy Super jet	Referencia 10112	M1	3.63	2.03
	Referencia 25060	M2	5.28	2.03
Terodyn 2000	Referencia 10112	M3	5.77	4.59
	Referencia 25060	M4	6.27	3.63

Tabla 2.3. Codificación de los polvos y flujo de los gases de combustión ⁽⁵⁾.

La relación molar de los gases utilizados para la combustión producida para la aplicación de los recubrimientos con la antorcha Eutalloy Superjet, es superior que la utilizada para la aplicación de los recubrimientos con la antorcha Terodyn 2000, debido a que esta última utiliza adicionalmente aire a alta presión para proporcionar energía cinética adicional a las partículas y dado que se desea obtener recubrimientos de similares características, se compensó la deficiencia en la energía cinética suministrada a las partículas por la antorcha Eutalloy Superjet, con la energía calorífica aportada por una mayor relación molar, con el fin de verificar si existe alguna variación en las propiedades mecánicas de un mismo material depositado con dos antorchas diferentes. En la figura 2.3, se presenta el aspecto superficial de los recubrimientos.

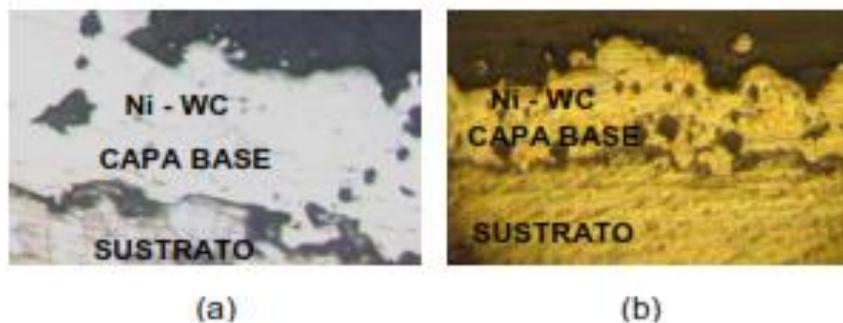


Figura 2.3 . Aspecto superficial del recubrimiento de Ni - WC usando⁽⁵⁾.
(a) Menor energía (b) Mayor energía

El conocimiento de las características fisicoquímicas de cada uno de los materiales a depositar, del calor y de la energía cinética que se puede lograr con una antorcha de proyección térmica permite obtener recubrimientos de buena calidad estructural y con



propiedades mecánicas que en algunos casos superan las especificadas por el fabricante del material.

Se han realizado estudios sobre la resistencia al desgaste de recubrimientos con características de composición similar como la que se utilizará en el presente trabajo la cual se denominará Aleación Estándar (AE), la cual está compuesta por NiCrBSiFe y la cual se proyectará utilizando la técnica de proyección térmica por flama. Un trabajo fue presentado en el 2007 en la revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela en el cual se estudia la caracterización de un recubrimiento NiCrBSiWFe depositados por el Proceso de Rociado Térmico de Alta Velocidad Oxígeno-Combustible (HVOF) realizado por Rodríguez, Moreno y Bilbao⁷.

Los polvos de alimentación fueron depositados sobre un sustrato de acero AISI 1020 utilizando para ello una pistola JP-5000. Posteriormente, los recubrimientos se trataron térmicamente con una llama oxiacetilénica. La evaluación de la resistencia al desgaste se logró mediante el ensayo de abrasión de acuerdo con la norma ASTM G65-A, B y C. La microestructura y composición química de los recubrimientos así como también las superficies de desgaste fueron evaluadas mediante Microscopía Óptica (MO) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y por Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía (EDX). Las investigaciones mostraron que la resistencia al desgaste se ve incrementada con el aumento de partículas de WC-Co en la mezcla, sin embargo, el aumento más significativo es debido al tratamiento térmico posterior lo cual fue atribuido al endurecimiento por precipitación de la matriz de níquel y a la mayor cohesión y mejor distribución de las partículas de segunda fase.

2.3 APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Se tienen reportes de recubrimientos depositados mediante Procesos de Rociado Térmico por plasma sobre cilindros de motores de gasolina y diésel. Los trabajos fueron reportados por Gérard Barbezat y Sulzer Metco⁸ en el 2005.

En el trabajo se reporta un estudio de deposición sobre cilindros de un monoblock de motor aplicando diferentes aleaciones por medio de proyección térmica por plasma y obteniendo un mejor rendimiento de desempeño al desgaste comparado con aquellos cilindros sin rociado térmico. La aleación utilizada fue de aluminio y magnesio y ofrecieron mejores desempeños de resistencia a la corrosión y resistencia a la abrasión comparados con los monoblocks sin recubrimiento.

En la figura 2.4 se aprecia uno de los recubrimientos obtenidos

⁷ Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Vol. 22, N° 4, pp. 25–35, 2007

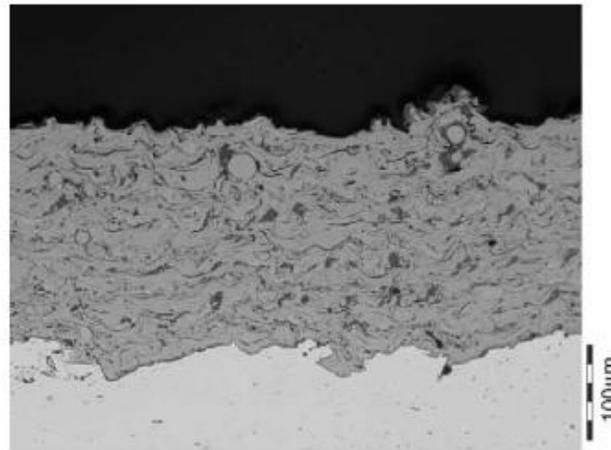


Figura 2.4 Rociado térmico por plasma utilizado para la deposición en cilindros de motores de combustión interna. ⁽⁸⁾

2.4 APLICACIÓN EN RECUBRIMIENTOS BIOCOMPATIBLES

Se tienen reportes de recubrimientos biocompatibles depositados mediante Procesos de Rociado Térmico por plasma.

Aunque el uso de biomateriales se remonta a la antigüedad, no fue hasta el siglo XX cuando se empezaron a utilizar los materiales biocerámicos en aplicaciones ortopédicas y dentales debido a las similitudes con los componentes que se encuentran en los tejidos duros. Pese a que estudios clínicos han demostrado la evidencia de osteointegración de la hidroxiapatita (HAp) su uso se ha limitado a aquellas aplicaciones que no soporten grandes cargas debido su carácter rígido y frágil. Una solución fue recubrir metales de manera que se aunaron las propiedades bioactivas que presenta la hidroxiapatita y las buenas propiedades mecánicas que ofrecen los metales, evitando los problemas de fragilidad de un implante totalmente cerámico. El recubrimiento de un metal con HAp es un proceso complejo y de él depende, en gran parte, el éxito clínico del implante. La proyección por plasma atmosférico (APS), aunque se trata de la técnica más utilizada por la industria, presenta el inconveniente de degradar térmicamente las partículas de HAp generando una fase amorfa y otras fases de fosfato de calcio que pueden ser resorbidas por el cuerpo degradando rápidamente el recubrimiento y comprometer el implante.

La proyección térmica por alta velocidad (HVOF) se presenta en este trabajo⁽⁹⁾ como una alternativa para obtener recubrimientos de gran calidad conservando las mismas ventajas que APS. Los materiales usados en implantes o prótesis son por definición biomateriales.⁹

⁸ Gérard Barbezat. Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1990 – 1993



Figura 2.5. Ejemplo de vástago de titanio de una prótesis no cementada (BiHAPro™ Modular Hip System, Biomet Merck).²

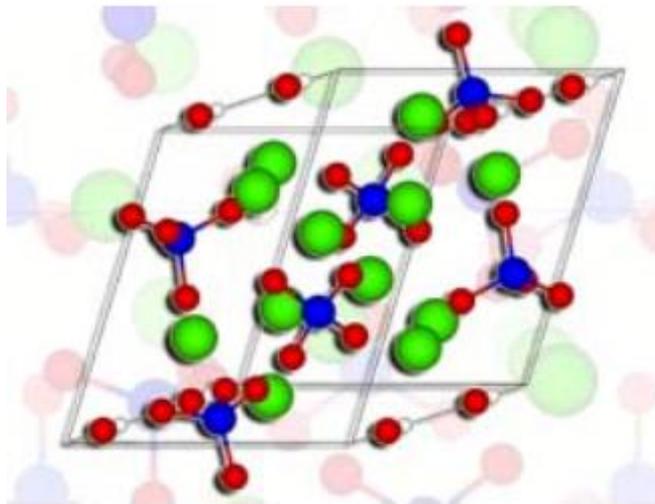
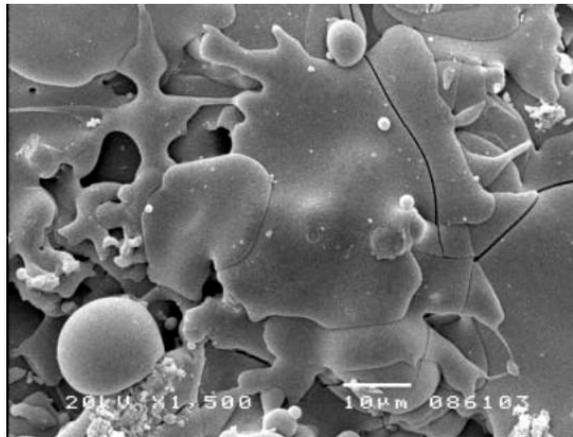


Figura 2.6. Red cristalina de la hidroxiapatita²

⁹H. Liang , B. Shi , A. Fairchild, T. Cale, Applications of plasma coatings in artificial joints: an overview.

TABLA 4	
Propiedades (unidades)	Valor para la HAp
Densidad (g.cm ⁻³)	3.15
Módulo de Young (GPa)	90
Dureza Knoop (MPa)	3450
Resistencia a la tracción (MPa)	120
Resistencia a la compresión (MPa)	430
Coefficiente de expansión térmica (x10 ⁻⁶ K)	11
Punto de fusión (°C)	1660

Tabla 2.4. Propiedades físicas y mecánicas de la hidroxiapatita²Figura 2.7. Superficie libre de un recubrimiento HAp (MEB x1500)²

2.5 APLICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA

Históricamente los procesos de rociado térmico han sido usados como métodos de reparación, reconstrucción y reajuste de elementos de maquinaria, restaurando las dimensiones originales, así como para proveer de resistencia a la corrosión o resistencia al desgaste a metales usados en diferentes tipos de estructuras tales como puentes, etc. La falta de comprensión sobre estos tipos de recubrimientos hace que en la industria se recurra a ellos como una última opción. En la actualidad muy pocos elementos de maquinaria son diseñados con recubrimientos obtenidos por rociado térmico.

²J. Fernández, J.M. Gilemany, M. Gaona. CPT Centro de Proyección Térmica. 2005



Es importante señalar que existe un creciente interés tecnológico y científico entre la comunidad de los materiales. Y debido a esto el proceso de rociado térmico está siendo cada vez más aceptado por el sector industrial. El primer sector de manufactura en usar y reconocer el gran valor y utilidad del rociado térmico fue el aeroespacial; y ha sido responsable del desarrollo y confiabilidad de estos recubrimientos.

Algunos ejemplos de aplicaciones industriales del rociado térmico son:

FUNCIÓN	USO	CAPA
Resistencia al desgaste		
Desgaste adhesivo	Cojinetes, aros del émbolo, mangas hidráulicas de la prensa	Óxido de cromo
Desgaste abrasivo	barras, sellos de bombas, tornillos, mezcladoras de concreto	Carburo de tungsteno, alúmina/Titanio, acero
Fatiga superficial Desgaste	levas, aspas de ventilador (motores de jet), turbinas	Carburo de tungsteno, cobre/níquel/ carburo del cromo
Erosión	extractores, colectores de polvo	Carburo de tungsteno
Resistencia térmica	turbinas de gas, conductos de extractor	Zirconia parcialmente estabilizada
Resistencia a la oxidación	vástagos de la válvula de escape	Aluminio, aleación del níquel/cromo, Hastelloy
Resistencia a la corrosión	Bombas, tanques de almacenaje, equipo de dirección de alimento	Acero inoxidable (316), aluminio, Inconel, Hastelloy
Conductividad eléctrica	Contactos eléctricos, conectadores de tierra	Cobre
Resistencia eléctrica	Aislamiento para los tubos del calentador, extremidades soldadas	Alúmina, Acero al carbono
Restauración	rodillos, cojinetes de tamaño insuficiente	Acero inoxidable

Tabla 1.8 Uso de Recubrimientos poliméricos obtenidos por rociado térmico en reemplazo de pinturas.¹



2.5.1 Aplicaciones Biomédicas

La principal aplicación del rociado térmico en la medicina son las prótesis (ortopedia y dental). Las prótesis son construidas de materiales bio-inertes tales como acero inoxidable, aleaciones de Co-Cr-Mo o Ti-Al.

Los recubrimientos usados para estos propósitos deben cumplir los siguientes requerimientos.

- Porosidad (20-40%)
- Biocompatibilidad y estabilidad en el cuerpo
- Buena adhesión para la prótesis.
-

El recubrimiento no debe ser rechazado. Después del crecimiento del hueso existen recubrimientos bio-activos que son cerámicos con composiciones muy similares a la estructura del hueso, el material interactúa con el hueso para fomentar su crecimiento al ligar sus interfaces. Estos cerámicos pueden ser rociados por plasma o por HVOF, y usualmente el recubrimiento es de un espesor de 40 a 80 μm . Un ejemplo de este tipo de material es el cerámico Hidroxiapatita que es fosfato de calcio (HA), ($\text{Ca}_{10} \cdot [\text{OH}]_6 [\text{PO}_4]$).



Figura 2.8 Una de las aplicaciones del rociado térmico en la medicina son las prótesis

2.5.2 Construcción de máquinas industriales

El potencial del rociado térmico en la construcción de máquinas industriales (textil, agroalimentaria, construcción de bombas, etc.) fue reconocido desde hace tiempo y muchas de las partes substituidas son ahora reconstruidas.

- Transmisiones y engranes son recubiertos por una capa de molibdeno para reducir la fricción y producir movimientos suaves y parejos.
- La superficie de los pistones. Generalmente es protegida con un recubrimiento cerámico.



- Las válvulas de escape trabajan en un severo ambiente de trabajo, un recubrimiento de Níquel-Cromo-Silicio-Boro aplicado generalmente por rociado térmico por flama, las protege del desgaste prematuro y de la corrosión.



Figura 2.9 Rociado térmico de elementos mecánicos

2.5.2 Protección catódica

Se utiliza éste sistema para la protección de concreto propenso a la corrosión especialmente en puentes. Esto se evita aplicando una capa de zinc por medio de rociado térmico, la cual actuará como un sistema de ánodo de sacrificio colocado sobre la superficie del concreto de los puentes, así como a las varillas propensas a la corrosión en donde actuará como un elemento activo frente al acero de la varilla, es decir, se oxida y cede electrones a ésta evitando que se corra. Se colocan cables conductores para la unión entre ambos metales. El electrolito es el concreto debido a los iones en él contenidos.

El recubrimiento es usado directamente sobre el concreto (substrato). El sistema de protección galvánica es más efectivo cuando el concreto tiene baja resistividad.



Figura 2.10 Protección catódica sobre la superficie del concreto de los puentes ¹⁰

¹⁰ Klaus Stahlmann Sulzer Technical Review 2013 pp. 28

2.5.3 Industria aeronáutica y aeroespacial

Hoy las aplicaciones en los turbo reactores representan gran parte del mercado de rociado térmico (20-40%) del total. El rociado térmico es aplicado en partes de los turbo reactores tales como ventiladores del compresor, álabes de las turbinas, etc.



Figura 2.11 Aplicación de rociado térmico en turbinas¹¹

2.5.4 Protección a la corrosión

Debido tanto a su bajo peso como a sus interesantes propiedades, las aleaciones de magnesio son susceptibles de ser usadas en aplicaciones de ingeniería, especialmente en la industria aeroespacial y, en general, en todas las industrias de transporte¹². Sin embargo, el uso del magnesio y sus aleaciones está limitado por su pobre resistencia a la corrosión. En la actualidad, la prevención de la corrosión del magnesio es de máxima importancia. Entre las diferentes opciones disponibles (composición de la aleación, diseño, etc.), los recubrimientos protectores pueden ser una buena opción para poder resolver este problema.^{13,14} El aluminio tiene la ventaja de tener mayor resistencia a la corrosión, en ambientes naturales, que el magnesio. Por otra parte, el aluminio es un metal ligero de relativo bajo costo y reciclable. Por tanto, la deposición de aluminio mediante proyección térmica puede constituir una vía sencilla para la protección frente a la corrosión de las aleaciones de magnesio. Considerando el interés de mejorar, tanto la resistencia al desgaste como a la corrosión de recubrimientos metálicos, en el presente trabajo se estudia el comportamiento a la corrosión de varios recubrimientos de aluminio reforzados con SiCp. Este tipo de partículas fueron elegidas debido a su elevada dureza, relativa baja densidad y bajo costo.

¹¹ Klaus Stahlmann Sulzer Technical Review 2013 pp. 29

¹² H. E. Friedrich y B. L. Mordike, *Magnesium Technology, Metallurgy, Design Data, Applications*, Springer Berlin, Alemania, 2006, pp. 499-631.



En estudios previos con recubrimientos de aluminio sin adición de refuerzo^{15,16}, la aplicación de un tratamiento posterior mediante presión en frío demostró ser una herramienta efectiva para mejorar la protección frente a la corrosión de los recubrimientos efectuados por proyección térmica. Sin embargo, la adición de SiCp, más rígido que el polvo de aluminio, puede dificultar el proceso de compactación durante el tratamiento posterior^{17,18}. Adicionalmente, puede producirse el ataque localizado por corrosión en la intercara matriz/refuerzo; en particular, en soluciones aireadas conteniendo iones cloruro¹⁹, donde la presencia de SiCp tiende a deteriorar la resistencia a la corrosión de la matriz de aluminio²⁰.

Se han realizado hasta hoy en día diferentes estudios sobre recubrimientos resistentes a la corrosión mediante diferentes técnicas de aplicación y con diferentes materiales tanto como sustrato como de aporte. Un estudio reciente revela mediante espectroscopía de impedancia electroquímica en solución 3,5 % NaCl, la protección frente a la corrosión de aleaciones Mg-Al recubiertas por proyección térmica con materiales compuestos Al/SiCp. Se varió la fracción de volumen de las partículas de SiC (SiCp) entre 5 y 30 %. Los recubrimientos efectuados por proyección térmica revelan un elevado número de microcanales, en la vecindad de las partículas de SiC, que facilitan la penetración del electrolito originando procesos de corrosión galvánica en los sustratos de las aleaciones de magnesio. Un tratamiento posterior mediante la aplicación de una presión en frío reduce el grado de porosidad de los recubrimientos y mejora la unión, tanto entre el sustrato y el recubrimiento como entre las partículas de aluminio y SiC, mejorando la resistencia a la corrosión de las aleaciones recubiertas. La efectividad de los recubrimientos disminuye ligeramente con la adición de SiCp cuando se comparan con los mismos recubrimientos de aluminio sin refuerzo.

¹³A. Yfantis, I. Paloumpa, D. Schemelber y D. Yfantis, *Surf. Coat. Technol.* 151–152 (2002) 400-404.

¹⁴A. J. Zhang, Y. Wang, R. Zeng y W. Huang, *Mater. Sci. Forum* 546–549 (2007) 529-532.

¹⁵A. Pardo, P. Casajús, M. Mohedano, A. E. Coy, F. Viejo, B. Torres y E. Matykina, *Appl. Surf. Sci.* 255 (2009) 6.968-6.977.

Material	Composición química (% masa)									
	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	Ca	Zr	Others
Mg (99 %)	0,006	0,014	0,03	0,019	0,001	0,004	<0,001			
AZ31	3,1	0,73	0,25	0,02	<0,001	0,005	<0,001	<0,01	<0,001	<0,30
AZ80	8,2	0,46	0,13	0,01	<0,001	0,004				<0,30
AZ91	8,8	0,68	0,30	0,01	<0,001	0,004	<0,008			<0,30

Tabla I. Composición química de las aleaciones ensayadas.

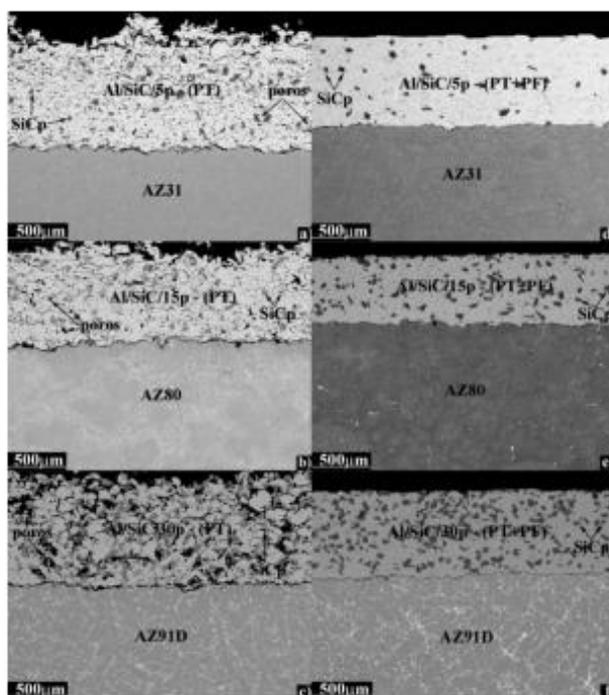


Figura 1. Morfologías MEB de electrones retrodifundidos de las secciones transversales de los recubrimientos de Al/SiCp-PT y Al/SiCp-(PT+PF) sobre las aleaciones :a) y d),Az31; b) y e), Az80 ;y c) y f) Az91D.

¹⁷ S. Suresh, A. Mortenson y A. Needleman, *Fundamentals of metal matrix composites*, Publisher: Butterworth-Heinemann, EE.UU., 1993, pp. 139-191.

¹⁹ H. R. D.M. Aylor and D. Taylor, *ASM Handbook: Corrosion of metal-matrix composites*, Vol. 13 A, ASM International, Materials Park, OH, EE. UU., 1978, pp. 525-542.

²⁰ M. S. Bin Selamat, *Adv. Perform. Mater.* 3 (1996) 183-204.

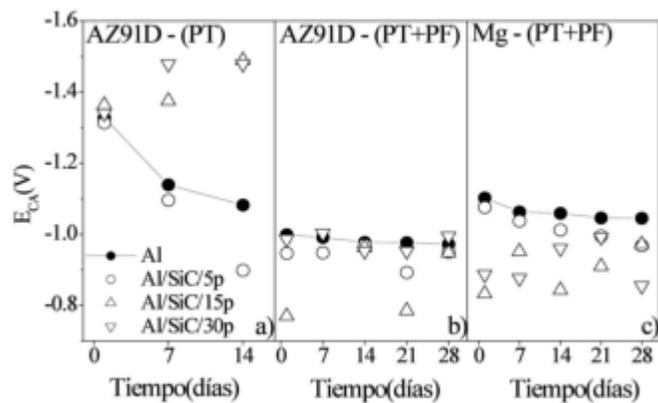


Figura 5. Evolución de los ECA de las muestras sumergidas en una solución de NaCl al 3,5 %.

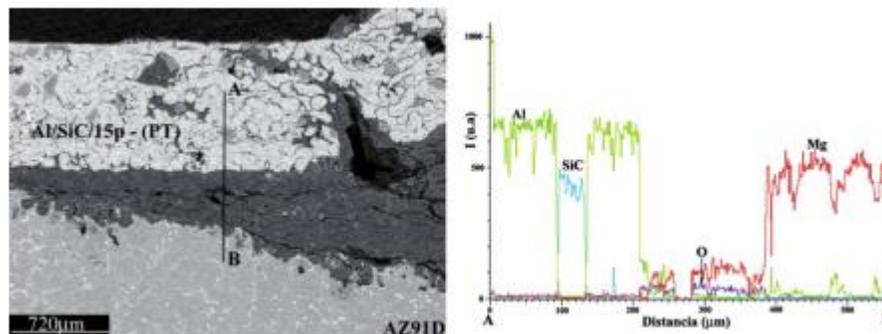


Figura 14. Metalografía MEB de la sección transversal y perfil de línea EDX de Mg, Al y O para el recubrimiento Al/SiC/15p-PT sobre la aleación AZ91D después de 14 días de inmersión en NaCl al 3.5 %.

Los recubrimientos de materiales compuestos Al/SiCp efectuados por proyección térmica revelan un elevado grado de porosidad con un pobre contacto, tanto entre las partículas de aluminio y SiCp como de las intercaras substrato/recubrimiento. La presencia de microcanales, principalmente localizados en la vecindad de las SiCp, facilita el proceso de corrosión galvánica de los substratos de magnesio con formación de hidróxidos de magnesio (brucita y hidrotalcita) en la intercara substrato/recubrimiento.

¹⁴ M. Campo, M. D. Escalera, B. Torres, J. Rams y A. Ureña, *Rev. Metal. Madrid* 43 (2007) 359-369.



De acuerdo con los resultados electroquímicos en NaCl al 3,5 %, la incorporación de SiCp reduce la resistencia a la corrosión de los recubrimientos en comparación con recubrimientos de aluminio sin partículas reforzantes efectuados por proyección térmica. Este efecto se hace más evidente cuando la proporción de refuerzo en el recubrimiento es muy elevada (Al/SiC/30p), mientras que es prácticamente insignificante cuando la proporción de refuerzo es baja y se ha consolidado el recubrimiento mediante presión en frío (Al/SiC/5p-(PT+PF)). En este último caso las muestras muestran un comportamiento similar a la corrosión que los mismos recubrimientos sin incorporación de refuerzo.



CAPÍTULO III

Diseño y fabricación del equipo de proyección térmica automatizado

3.1 INTRODUCCIÓN

Es necesario comprender el concepto de diseño y la idea que se requiere plasmar, ya que de ahí se debe partir para comenzar la creación y la automatización de un proceso. Para ello, se deben conocer las bases para la utilización de técnicas y tecnologías ya existentes en el mercado actual.

Cuando se piensa en lanzar un producto nuevo al mercado, es necesaria la intervención de varias disciplinas, ya que no solo la ingeniería es la única en tener todos los créditos debido a que son varios los factores que intervienen.

Se deben tratar todos los problemas que conllevan al diseño dentro de la ingeniería, ya que se pueden encontrar ciertas complicaciones al tratar de aplicar distintos conceptos.

Para la realización de un buen proyecto se necesitan tener buenos conceptos del diseño, así como también mantenerse dentro de una disciplina y un orden dentro del desarrollo de éste. Todas las personas que están involucradas dentro del proyecto deben tener un amplio criterio para así poder tomar las mejores decisiones.

El diseño debe ser instruido y aplicado progresivamente en una amplia gama de recursos de información, así como de técnicas para incrementar la destreza dentro de éste, aplicando con ello la habilidad de la ingeniería.

El diseño es la actividad sistemática necesaria para la identificación de problemas humanos dentro de un mercado bastante amplio, así como la venta del producto terminado dentro de un mercado de grandes exigencias.

Los cimientos del diseño consisten en la ubicación de las necesidades del usuario, las especificaciones del diseño del producto, diseño conceptual, diseño de detalle, diseño de manufactura y la salida del mercado. "Todo diseño comienza en una necesidad", la cual, cuando ésta complazca al usuario, entrará en un mercado exclusivo de competición.



Del concepto de la necesidad, una Especificación del Diseño del Producto (PDS) debe ser elaborada, la cual interactuará para el mejoramiento de los diseños subsecuentes dentro de las bases del diseño.

La PDS es un margen de restricción en la actividad del diseño total, ya que coloca las limitantes para los diseños subsecuentes.

Un análisis de cualquier producto existente revelará el flujo obtenido desde el proyecto hasta la venta de éste en el mercado. Esta actividad será referida como la base del diseño.

En todas las etapas dentro del proceso, las bases del diseño son operadas interactivamente y éstas aparecen paulatinamente. Entonces, las bases del diseño podrán aparecer en cualquier punto del proceso y que ciertos puntos de éste interactúen será inevitable, pero esto se puede minimizar si se llevan las bases del diseño con rigurosa exactitud.

Las interacciones ocurren debido a que cambian las circunstancias (esto es, que cambien las características de los productos), causando que la PDS evolucione en conjunto con las bases del diseño.

Para colocar el diseño a ser utilizado efectiva y eficientemente, es necesaria la utilización de técnicas del diseñador o equipo de diseño en el desarrollo del diseño. Estos utilizarán un kit de herramientas necesarias para concretar el producto, las cuales pueden ser técnicas de análisis, síntesis, toma de decisiones, modelaje, etc., que se pueden aplicar a cualquier diseño.

Los dos tipos de herramientas a utilizar son la disciplina, o la tecnología dependiente o independiente. Es necesario considerar y entender "él todo" como un concepto de diseño total, concernido en la creación de productos colocando esto en un marco de planeación y organización como se muestra en la figura 3.1 (en donde el autor Stuart Pugh¹⁰ describe los pasos que sigue un producto antes de salir al mercado). Se comenzará a buscar una idea de los productos que deberán ser utilizados y de cómo se colocarán en la estructura del proyecto.

¹⁰ Pugh Stuart. Total desing. Ed. Adisson – Wesley Publishing Company, Great Britain, 1990

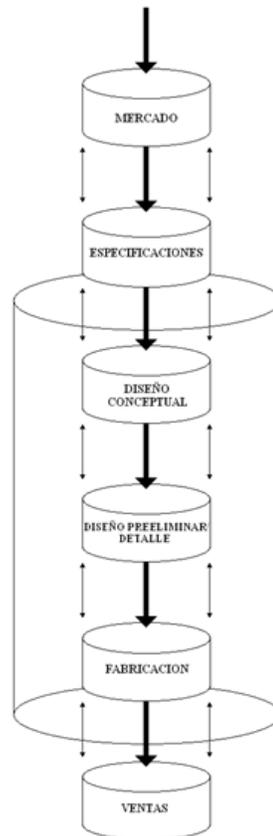


Fig. 3.1. Modelo de Pugh de diseño y desarrollo de un producto.

3.2 IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD

Debido a los distintos problemas que se presentan en la utilización del proceso de proyección térmica, es necesario encontrar una solución eficaz ayudando con esto a un ahorro de tiempo, dinero y esfuerzo, es decir, la reducción de merma de material, mayor producción, la eliminación casi total del factor hombre, lo que conlleva a la notoria disminución de los índices de accidentes dentro del área de trabajo, así como una amplia gama de calidad dentro del proceso que no se puede obtener de la mano del hombre, ya que este se ve afectado por distintos factores como lo pueden ser la fatiga, la inestabilidad en la aplicación del proceso, entre otros.

Dentro del proceso de Proyección, uno de los problemas que se presentan además de los ya mencionados, nos encontramos con la mesa de trabajo, ya que ésta muestra la problemática de soportar cuerpos a revolución y cuerpos con múltiples superficies.



También se pueden mencionar que algunos parámetros se ven afectados a la hora de la proyección debido a la inestabilidad de sujeción en la mano del ser humano u operario; estos parámetros son: espesor constante, la no porosidad y la única forma en la que se pueden conseguir en su máxima expresión es realizando la automatización del proceso.

En este trabajo se realizará el montaje de una pistola rociadora por flama en un brazo mecánico (MOTOMAN), en el cual surge el inconveniente de que al fabricar la base de dicho elemento tenemos que analizar el diseño y los pesos requeridos utilizando materiales ligeros para tal proceso, tomando en cuenta que esto último se torna como una gran limitante, ya que el brazo mecánico en su estructura de soporte nos muestra la desventaja de inestabilidad al exceder el peso para el cual fue diseñado. Con esto tenemos que idear un proyecto en el cual se facilite el accionamiento de manera automática del equipo para la proyección sin que se presente algún problema.

Surge también la necesidad de la activación del proceso de encendido de la pistola rociadora debido a que está diseñada para trabajar en forma manual.

Como primer paso se debe dar apertura a la válvula de paso de gases en forma gradual, hasta que exista una adecuada presión para lograr proyectar el material de aporte y a su vez, se debe producir la combustión por medio de una chispa. Después de ello, se debe activar el gatillo para que el polvo utilizado para el rociado comience a salir del contenedor colocado en la parte superior de la pistola rociadora. Por último, se debe cerrar el paso de gases. Una vez conocidas las necesidades para la automatización del proceso, se procederá al diseño de los elementos que compondrán tanto al soporte de la pistola rociadora como al conjunto de elementos para el accionamiento que automatizarán el proceso.

3.3 DISEÑO CONCEPTUAL

La idea conceptual de la base del diseño es primordialmente la generación de soluciones para conocer las necesidades primarias, es decir, las PDS (Especificación de Diseño del Producto). Cualquier valor de diseño tiene su origen en la PDS. El diseño conceptual se puede definir entonces como la totalidad del elemento proyectado, la cual es la suma de todos los subsistemas o los componentes que van a crear ese sistema. Esta fase conceptual se divide en dos componentes cíclicos:

- 1) La generación de soluciones para conocer la necesidad primordial.
- 2) La evaluación de estas soluciones para seleccionar la más aplicable para enfrentarse a la PDS.



Tal vez será necesaria una depuración del procedimiento que se repetirá varias veces para confirmar lo logrado, esto dependiendo de la complejidad del proyecto y con ello llegar a un diseño final, el cual se manufacturará. Estas evaluaciones tal vez afecten matrices.

Una vez encontrado el problema del proceso, es necesario presentar las posibles soluciones y representarlas por bosquejos para su fácil entendimiento, así como también explicar las ventajas y desventajas entre ellas para llegar a una apropiada selección del diseño final y así llevar al proceso de manufactura.

Debido al diseño de la pistola rociadora que a continuación se presenta (figura 3.2), se mencionan dos de las posibles soluciones para el montaje de ésta en la articulación de trabajo del brazo mecánico (MOTOMAN). Ver figura 3.3 y 3.4.

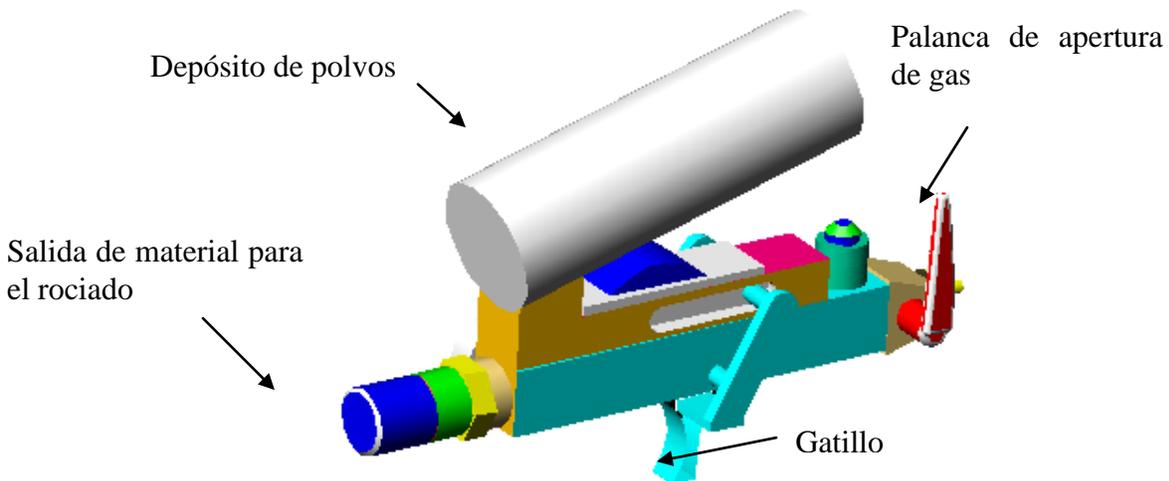


Figura 3.2. Esquema de una pistola rociadora modelo 5PII de marca SULZER METCO

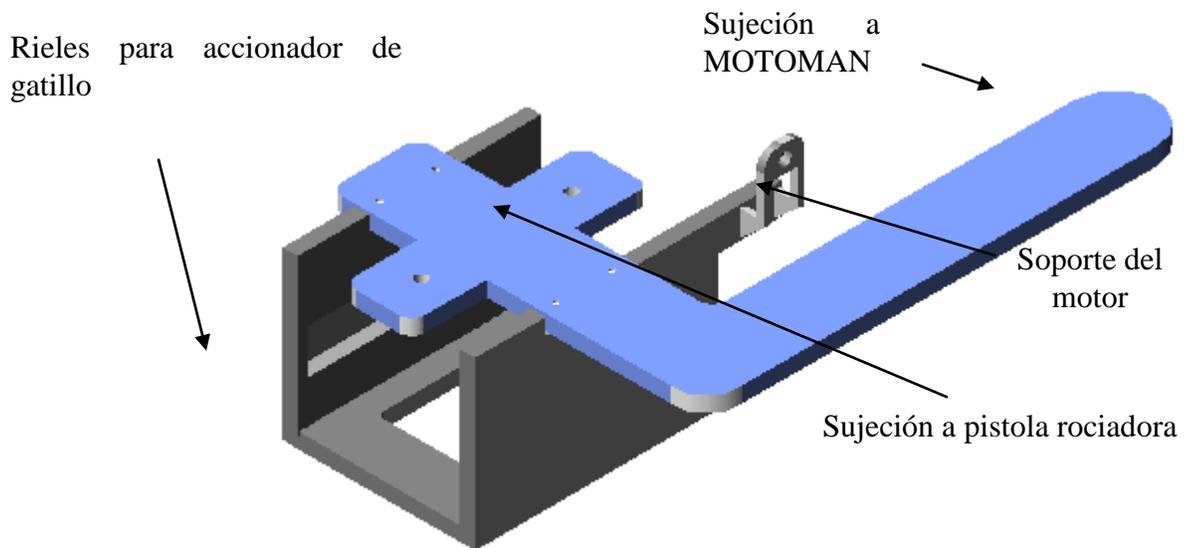


Figura 3.3. Sistema de acoplamiento de la pistola rociadora al brazo mecánico (las dos piezas en conjunto forman el aditamento)

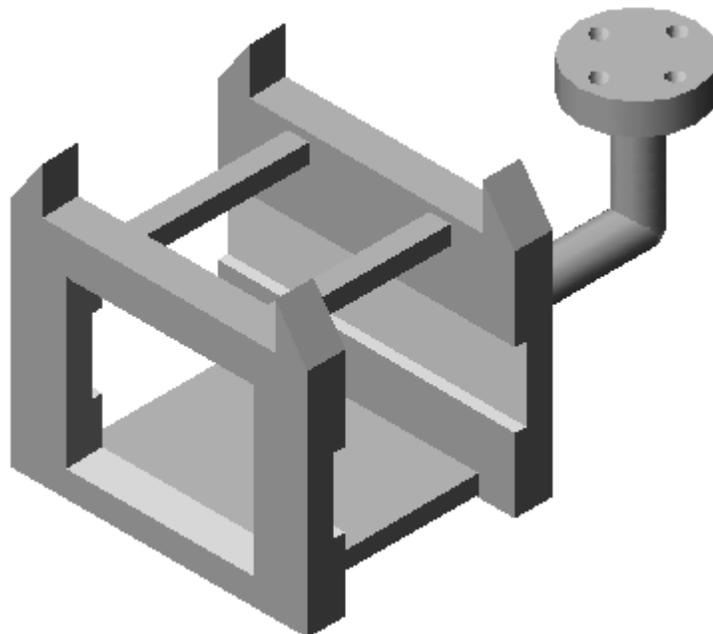


Figura 3.4. Pieza para el montaje de la pistola rociadora a la articulación de trabajo del brazo mecánico



A continuación se presenta una tabla la cual compara las ventajas y las desventajas que tenemos al fabricar uno u otro de los armazones.

	Ventajas	Desventajas
Figura 3.3	<ul style="list-style-type: none">• La utilización de menos material para la fabricación.• Se retira el conjunto de sujeción de la brida ya que este presenta un excedente de peso; así como, se desmonta el manguillo de sujeción para trabajo manual.	<ul style="list-style-type: none">• En su estructura se torna más frágil• Al requerir utilizar la pistola rociadora en un trabajo manual es necesario el invertir tiempo para la colocación del manguillo de sujeción.
Figura 3.4	<ul style="list-style-type: none">• Nos presenta una mejor estructura para la resistencia en cuanto a peso del la pistola rociadora.• Se puede utilizar de manera inmediata en forma manual.	<ul style="list-style-type: none">• El excedente de peso es una característica que afecta a este prototipo.• El accionador se ve afectado ya que en esta presentación la pistola cuenta con el manguillo de sujeción para trabajo manual.

Los siguientes modelos que se presentan son los que se proponen para el accionamiento del gatillo que permitirá el paso de los polvos de material de aporte para el recubrimiento en la pistola rociadora. Figuras 3.5 y 3.6.

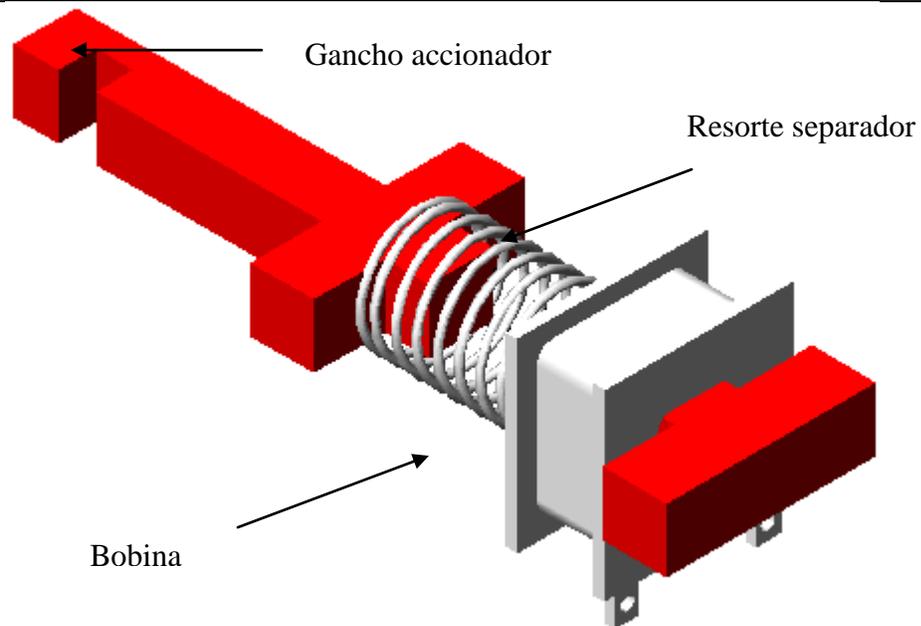


Figura 3.5. Accionador sin paredes de refuerzo para el campo magnético

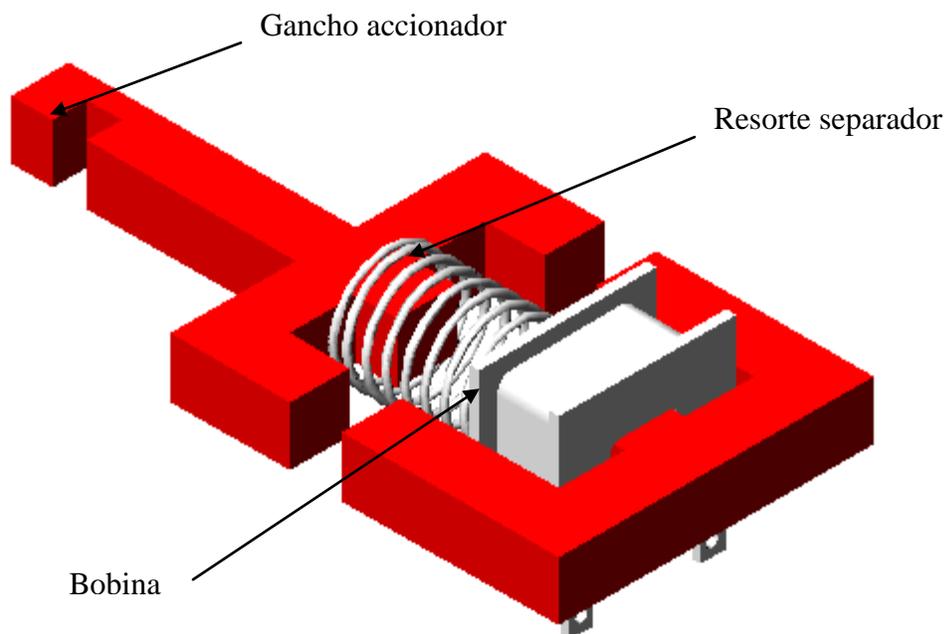


Figura 3.6. Accionador con paredes de refuerzo para el campo magnético

La siguiente tabla compara las ventajas y las desventajas que tenemos al fabricar uno u otro de los accionamientos para el gatillo.



	Ventajas	Desventajas
Figura 3.5	<ul style="list-style-type: none">• Es más ligera y puede hacerse que la estructura reduzca considerablemente su dimensionamiento.	<ul style="list-style-type: none">• El campo magnético disminuye y por consiguiente el accionamiento del gatillo puede no lograrse en su totalidad.
Figura 3.6.	<ul style="list-style-type: none">• Su campo magnético es mayor y con esto obtenemos una mayor fuerza en el accionamiento del gatillo.	<ul style="list-style-type: none">• Aumenta su volumen y por consiguiente la estructura se torna de mayor tamaño.

A continuación se muestra el modelo a utilizar para la apertura del gas de la pistola, así como el elemento que otorgará, mediante la producción de una chispa, la combustión de los gases.

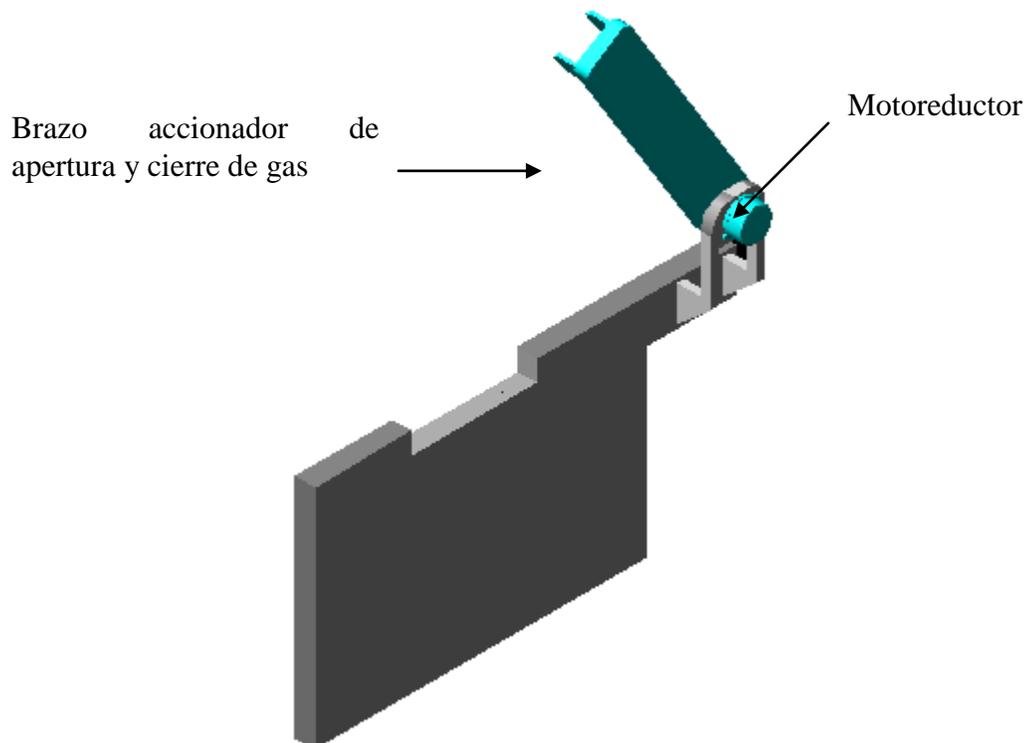


Figura 3.7. Elemento para la apertura del gas de la pistola



A continuación se muestra el siguiente modelo que por sus características se podría optar para la colocación de la pistola rociadora en el brazo mecánico (MOTOMAN) y con esto poder automatizar el proceso de proyección térmica, así como el funcionamiento de cada uno de sus componentes.

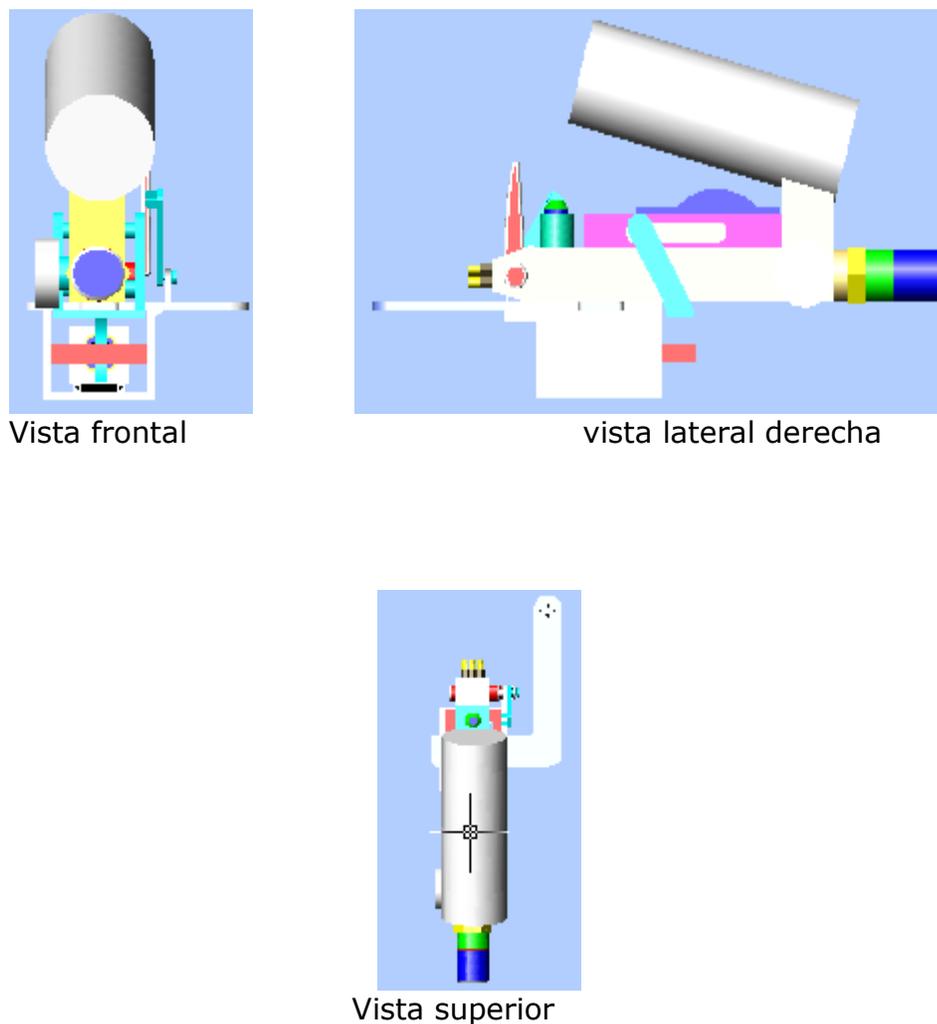


Figura 3.8. Vistas del equipo elaborado en distintos ángulos

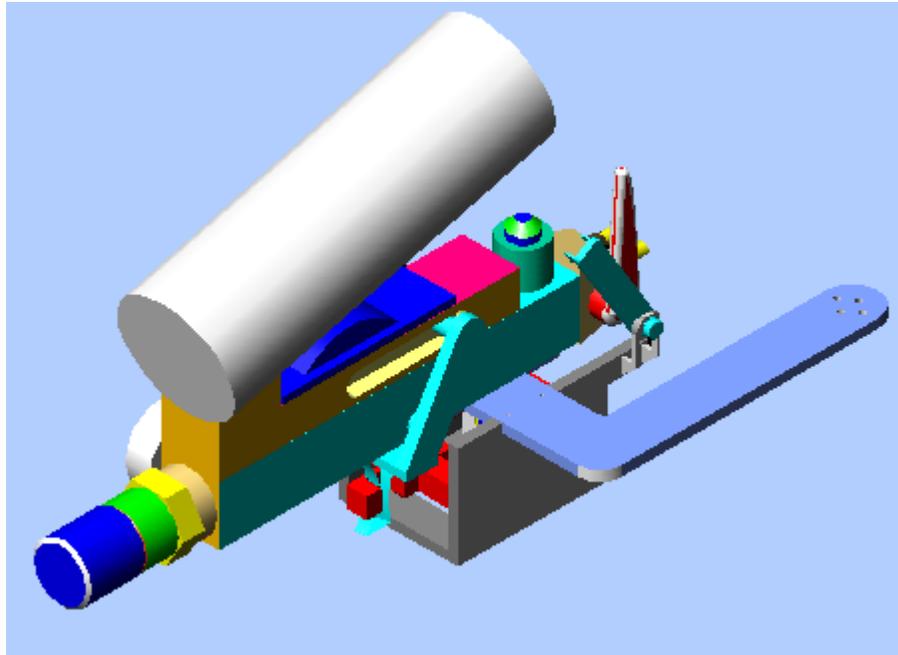


Figura 3.9. Pistola colocada en el elemento de automatización

3.4 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL EQUIPO

- Paso 1. La palanca para la apertura de los gases es accionada por un motor que a su vez enciende en un primer término un switch que activará el electrodo para la creación de la chispa de encendido que nos proporcionará la combustión. A continuación, el brazo del motor accionará un segundo switch que detendrá el motor reductor.
- Paso 2. El brazo mecánico (MOTOMAN) se posicionará a cierta distancia (aproximadamente de 20 a 25 cm) del material base el cual será proyectado.
- Paso 3. Una vez posicionado el punto inicial de la aplicación, se procede al accionamiento del gatillo; esto se realiza energizando a la bobina que activará el gancho de disparo, quedando accionado el sistema de rociado.

- Paso 4. Se desenergizará la bobina de accionamiento del gatillo, dando como consecuencia la desactivación del rociado de material de aporte.
- Paso 5. En este momento el moto reductor invertirá su sentido y cerrará en su totalidad la válvula de los gases
- Paso 6. Terminado el proceso de rociado se alejará al brazo mecánico a una distancia considerable de la pieza de trabajo, dando con ello término el ciclo programado del sistema automatizado de rociado térmico.

La figura 3.10 muestra el prototipo a seguir para el ensamble de la pistola rociadora con el brazo mecánico.

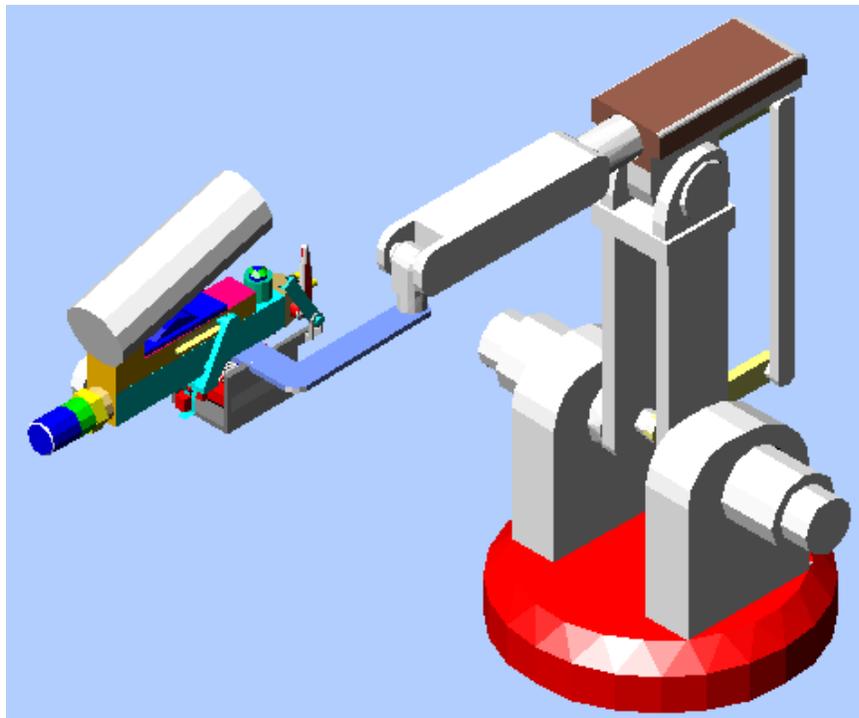


Figura 3.10 Esquema del equipo generado para el proceso de rociado térmico automatizado



3.5 DISEÑO DE DETALLE

En el diseño de detalle se tienen que idear varias posibles respuestas a un problema para poder dar solución a éste. Estas ideas se integran de la mejor manera para poder obtener un concepto completo, en conjunto con la teoría básica, así como con las diferentes tecnologías para que dentro de las bases de la ingeniería se logre un mejor resultado.

Hoy en día todos los productos están hechos de un conjunto de elementos que los integran (los detalles), los cuales a un mayor o menor grado de descripción son definidos en su forma durante el diseño, pero éstas pueden llegar a variar considerablemente durante el proceso de detalle gracias a las posibilidades de manufactura, forma, etc., a las cuales son sometidas.

Al preparar el diseño de detalle es de vital importancia tener las especificaciones del producto a desarrollar, esto con el fin de poder alternarlas o mejorarlas durante el proceso.

Si al terminar un producto se requiere realizar una mejoría, será necesario mejorar las especificaciones de diseño, de manufactura, etc., lo cual conllevará a tener un proceso más eficaz debido a que estará preparado para tecnologías futuras.

Los pasos a seguir para la realización del proceso de automatización son los siguientes:

- Paso 1. La apertura del gas será activada mediante el brazo del motoreductor, así como ,a su vez, accionará un primer switch que encenderá el electrodo, el cual proporcionará una chispa con la que se obtendrá la combustión de gases, encontrando posteriormente la presión adecuada, el motoreductor se desactivará mediante el accionamiento de un segundo switch.
- Paso 2. A continuación, el brazo mecánico posicionará a la pistola de rociado en el punto inicial de trabajo a una distancia aproximada de entre 20 y 25 cm.
- Paso 3. Una vez encontrado dicho punto se activará el rociado. Esto se realizará mediante la energización de la bobina del gatillo que a su vez ésta atraerá al gancho que accionará al gatillo. la Bobina permanecerá activada dejando el sistema de rociado activado. Este procedimiento podrá ser repetido las veces



que se desee, energizando y desenergizando el accionador, propiciando con ello el ahorro de material de aporte.

- Paso 4. Terminado el proceso de rociado se alejará al brazo mecánico a una distancia considerable de la pieza de trabajo y se desenergizará al accionador, lo que conlleva a la desactivación de la proyección de material de aporte.
- Paso 5. En este momento el motoreductor invertirá su sentido y cerrará en su totalidad la válvula de los gases, dando con ello término al sistema de automatización del proceso.

3.6 DISTINTOS TIPOS DE MODELADO

Una vez dadas a conocer las distintas propuestas para llegar a la automatización del proceso en un sistema de metalizado por rociado térmico, será necesario un modelado de cada uno de los componentes a desarrollar.

Existen diferentes formas de realizar o de representar un diseño, dentro de las cuales existen las siguientes:

Modelo de alambre, modelado de superficies, modelado paramétrico, modelado geométrico y modelado de sólidos.

El modelado que se optó por utilizar será el de modelado de sólidos, ya que este nos proporciona una imagen clara de los elementos a representar.

REPRESENTACIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE EL MODELADO DE SÓLIDOS

A continuación se representan las distintas partes a utilizar para la realización del proyecto de automatización del proceso.

En un primer término se muestra el diseño final para el soporte de la pistola y de la carcasa, así como del acoplamiento al brazo mecánico. Figura 3.11.

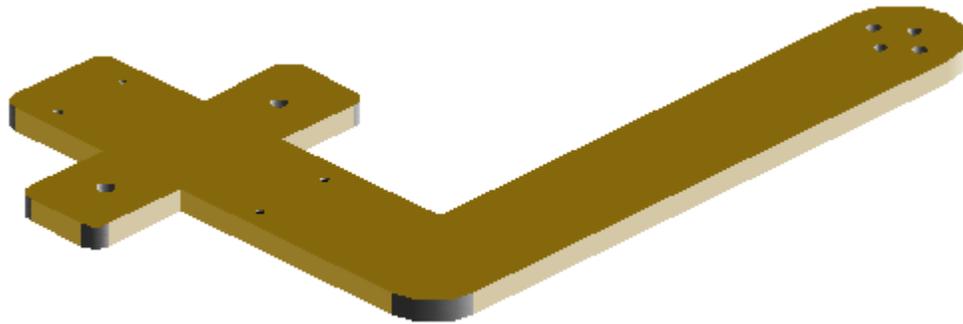


Figura 3.11. Soporte

A continuación se presenta el sistema de disparo para el accionamiento del gatillo de la pistola rociadora Figura 3.12.

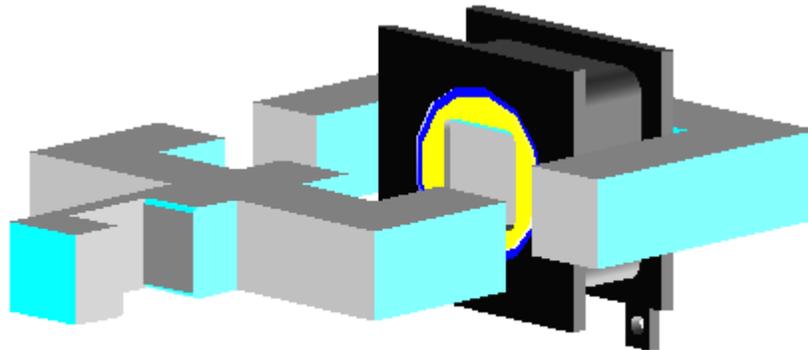


Figura 3.13. Sistema de disparo para el accionamiento del gatillo

Es necesaria la utilización de un sistema de soporte para el diseño del accionamiento del gatillo antes mencionado. Para ello se representa el diseño para el sistema soporte. Figura 3.14.

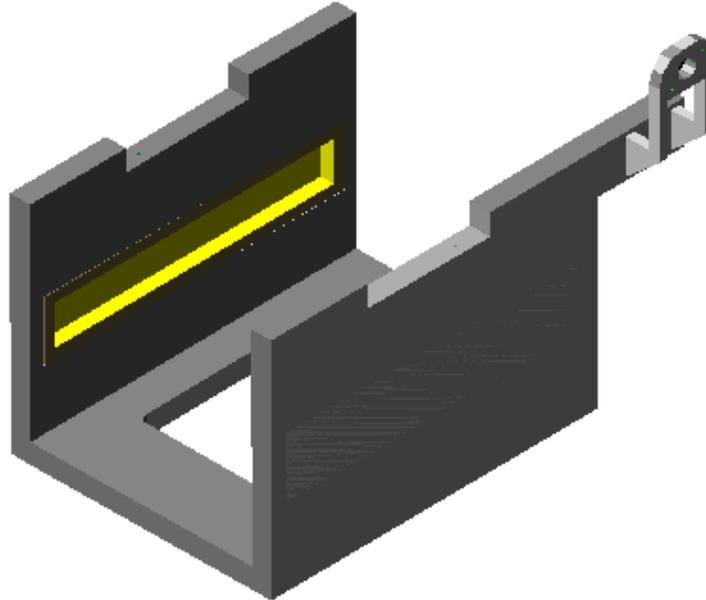


Figura 3.14. Carcasa

Para el sistema de encendido se representa un brazo mecánico el cual accionará la válvula de apertura de gases por medio de un motoreductor que estará mecánicamente acoplado a la carcasa. Figura 3.15.

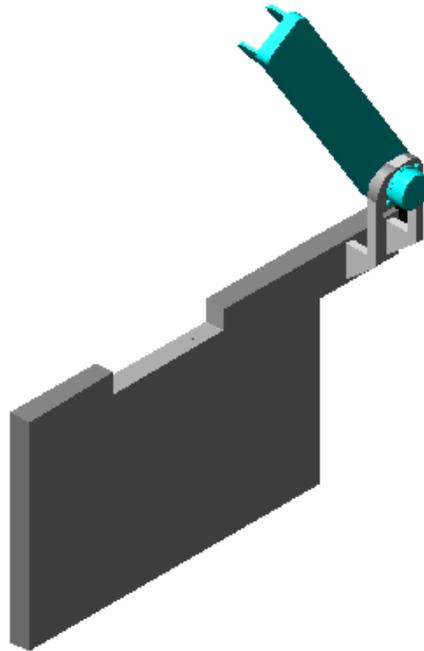


Figura 3.15. Sistema de accionamiento de la válvula

En la siguiente figura se representa el sistema de automatización de rociado térmico ilustrando el acoplamiento de todos sus componentes. Figura 3.16.

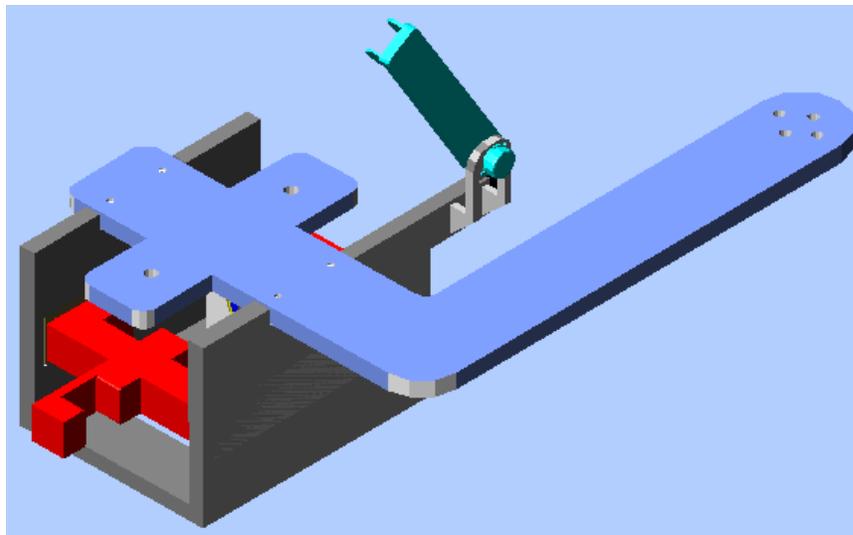


Figura 3.16. Equipo ensamblado

En la figura 3.17 se representa el montaje de la pistola de proyección térmica sobre el sistema de soporte y acoplamiento.

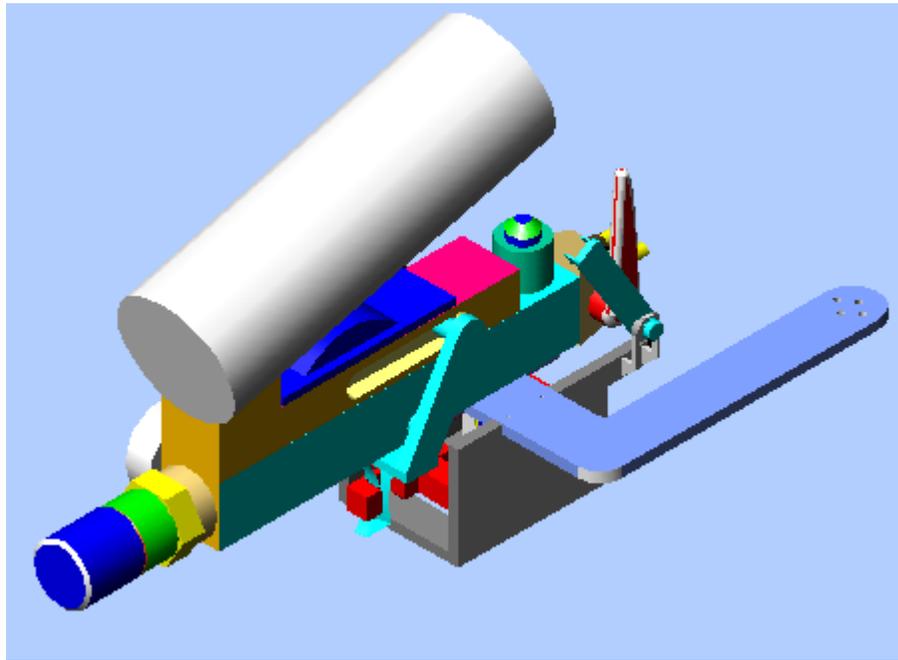


Figura 3.17. Pistola colocada en el elemento de automatización

A continuación se muestra el diseño terminado, en donde se ilustra la colocación que se requiere del equipo de automatización en el brazo mecánico (MOTOMAN) para un correcto funcionamiento del proceso. El modelo representado es el que pretende ser la mejor opción en cuanto a fabricación, costos y sobre todo la principal restricción que se presenta que es el ahorro de peso en todo el conjunto del equipo. Figura 3.18.

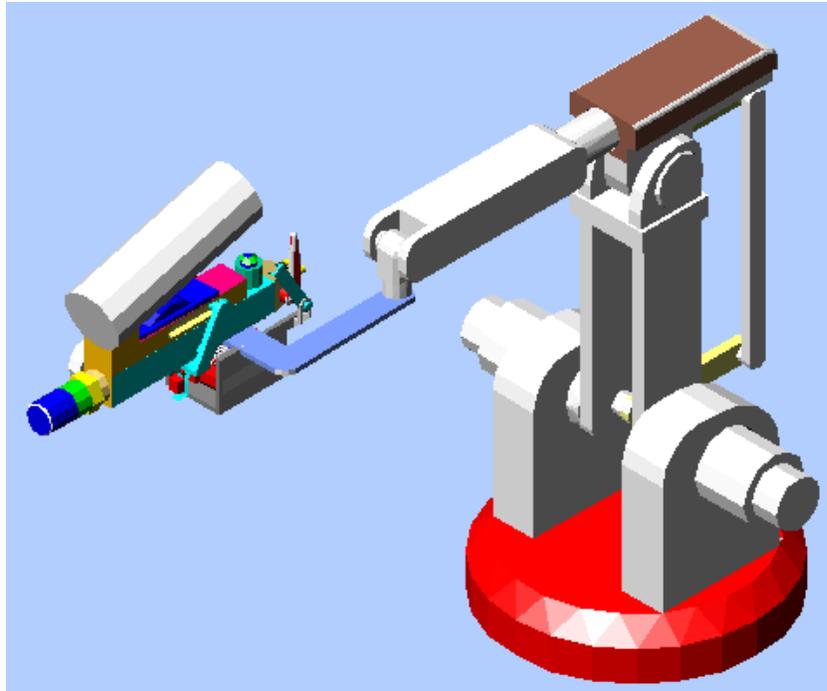


Figura 3.18. Brazo mecánico con el aditamento de automatización de la pistola de proyección térmica

➤ FABRICACIÓN DE ELEMENTOS

En esta sección se establecerán las condiciones a las cuales los materiales serán sometidos dentro de un proceso de maquinado para la elaboración física de las partes. Esto se realizará con una máquina fresadora de control numérico (CNC) debido a las características de elaboración de las partes que constituyen el equipo.

En la actualidad un proceso de maquinado es el medio de fabricación más ampliamente utilizado en la industria, ya que en éste es obtenida una gran variedad de tipos de geometrías a un alto nivel de precisión dimensional.

Hoy en día también han tenido un avance significativo los procesos de adición de material por diferentes técnicas como son estereolitografía, deposición de material fundido(FDM), modelado por encolado de papel, resinas fotosensibles, etc.

Dichos procesos serán considerados para la fabricación de algunas piezas que facilite el desarrollo del sistema a diseñar para la mejora del ensamble final del equipo de proyección térmica automatizado.



➤ MATERIALES Y HERRAMIENTAS

Materiales de Piezas.

El material que se piensa maquinar es una de los condicionantes que se tienen para iniciar el proceso y sabiendo sus características físicas, nunca se sabe cómo responderá el material al proceso, esto debido al nivel elevado de factores que intervienen en él. Aunque ya existen valores predeterminados para la intervención del material, en ocasiones no se ajustan en una situación en particular, aunque al final sirven como base para realizar los ajustes pertinentes que conlleven a una solución eficaz y productiva.

Los materiales que se pretende maquinar son el aluminio y el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Este último tiene su propia máquina de modelado y deposición la se utilizara en este trabajo, la técnica es la de modelado de deposición por fusión (FDM).

En este trabajo se utilizará un Centro de maquinado CNC, la cual presenta el siguiente funcionamiento.

El cortador a utilizar para desarrollar el trabajo es de 4 filos, dentro del cual se pueden desarrollar distintos procesos como lo es el careado, el contorneado, cajeado y la rectificación de la pieza a trabajar.

➤ ESPECIFICACIONES

Una vez obtenido el diseño aprobado es necesario encontrar el tipo de material que se tendrá que utilizar para la fabricación y construcción del mismo. Esto nos conlleva a la utilización de un margen de selección llamado Índice de Propiedades Ponderantes o de Desempeño, con el cual obtendremos la elección del material adecuado, según las necesidades del proyecto.

SELECCIÓN DE MATERIAL

La selección de materiales utilizada para la realización de este proyecto se utilizará el método del Índice de Propiedades Ponderantes, para lo cual se requiere del conocimiento de las propiedades más importantes a discutir de cada material y la aplicación de la expresión:



$$\gamma = \sum \beta_i \omega_i$$

donde:

- γ Índice de propiedades ponderantes.
 β_i Escala de la propiedad.
 ω_i Factor de peso.

En primer lugar se va a determinar el número de combinaciones entre las propiedades tomadas de dos en dos. Dichas propiedades son:

1. Temperatura de fusión.
2. Peso específico
3. Dureza
4. Rigidez

De la fórmula de combinaciones:

$$N = \frac{n(n-1)}{2}$$

sustituyendo $n = 4$, se obtiene un total de 6 combinaciones.

Se elabora un cuadro con el número de la propiedad en forma vertical y las combinaciones entre éstas en forma horizontal; en cada combinación se asignará 1 (uno) para la propiedad más importante y 0 (cero) para la menos importante.

El cuadro queda como el siguiente:

Propiedad	Combinaciones					
	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4
1	0	0	0			
2	1			1	1	
3		1		0		0
4			1		0	1



A continuación se calcula el factor de peso (ω_i) de cada propiedad mediante la expresión:

$$\omega_i = m_i / N$$

donde "m" es la suma de las decisiones positivas (1s) de cada propiedad.

Propiedad	Decisiones positivas m_i	Factor de peso ω_i
1	0	0.0000
2	3	0.5000
3	1	0.1667
4	2	0.3333

Para la escala de la propiedad se pondera de 0 a 100, asignando 100 para el mejor valor de acuerdo a lo que se desea y los valores restantes se obtienen por regla de tres.

Material	Temperatura de fusión (°C)	Escala de la propiedad (β_i)
Aluminio	660	47.14
Acero	1400	100
Bronce	900	64.29
Latón	940	67.14

Material	Peso específico (Kg/dm ³)	Escala de la propiedad (β_i)
Aluminio	2.77	100
Acero	7.85	35.2866
Bronce	7.59	36.4954
Latón	8.80	31.4773

Material	Dureza Brinell	Escala de la propiedad (β_i)
Aluminio	95	39.4191
Acero	200	82.9876
Bronce	241	100
Latón	143	59.3361



Material	Módulo de elasticidad (Kg/mm ²)	Escala de la propiedad (β_i)
Aluminio	7030	33.4762
Acero	21000	100
Bronce	11240	53.5238
Latón	11950	56.9048

Nota: Los materiales son: aluminio 6061, acero 1045, bronce aleado con aluminio y latón Cu 90 Zn 10.

Se reúnen todos los valores obtenidos para calcular el índice de propiedades ponderantes.

Material	Temperatura de fusión. (β_i, ω_i)	Peso específico (β_i, ω_i)	Dureza (β_i, ω_i)	Módulo de elasticidad (β_i, ω_i)	Índice de propiedades ponderantes.
Aluminio	0	50	6.571 2	11.1576	67.7288
Acero	0	17.6433	13.83 40	33.33	64.8073
Bronce	0	18.2477	16.67	17.8395	52.7572
Latón	0	15.7386	9.891 3	18.9664	44.5963

Finalmente se selecciona el material con mejor índice. En la tabla se observa que el aluminio finalmente es el material que se utilizará para la fabricación del soporte del equipo de proyección y automatización.

➤ ELEMENTOS DE ENSAMBLE

Los ensamblajes necesarios para la sujeción de las piezas que son extraíbles se realizarán por medio de tornillos de material galvanizado para evitar la corrosión. Los tornillos que se utilizarán son milimétricos del tipo M3 x 1 de cabeza del tipo hallen de 3 mm de diámetro por 0.625 mm de longitud en cuerda estándar, también se utilizarán tornillos de cabeza de gota en forma plana de 2.5 cm y de 6.25 cm de largo por 0.125 mm de diámetro para los dos tipos. Estos últimos con tuerca hexagonal y en cuerda estándar.



CAPÍTULO IV

Banco de pruebas del equipo automatizado

4.1 INTRODUCCIÓN

Para la realización de las pruebas se optó por realizar un programa que recubriera una superficie de 12.5 por 5 cm colocado sobre una mesa de pruebas con la inclinación de 30° aproximadamente y la posición de ésta correctamente. El programa fue creado con programación de lenguaje de control avanzado ACL, el lenguaje se utiliza en las diferentes series de robots de la marca MOTOMAN.

La duración del proceso del rociado fue de 5 minutos que fue el tiempo elegido luego de una serie de pruebas realizadas previamente para proporcionar los recubrimientos. A la postre fueron 50 pruebas de revestimientos superficiales.

Las piezas a recubrir se prepararon previamente por medio del granallado para la correcta aleación del material de relleno y la pieza.

Se realizaron diferentes pruebas de granallado variando tiempos de aplicación y presión de lo cual se obtuvo el valor óptimo.

4.2 SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN (MECANICA) DEL PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA

En éste capítulo se mostrarán las piezas terminadas tanto en diseño como en forma física, además de detallar el comportamiento mostrado durante el desarrollo del trabajo para la cual fue efectuada la deposición de cada una de ellas. Al mismo tiempo se mencionará si fue necesaria alguna modificación de importancia para tener un mejor resultado. Cabe mencionar que todas las piezas fueron diseñadas en el programa de CAD 3D Solid Edge. Para la generación de las piezas estas fueron fabricadas con material ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), el diseño de las piezas se trasladó de SOLID EDGE al programa CATALYST. Este último se dieron los parámetros de fabricación y las tolerancias dimensionales para la fabricación de las piezas la cual fue de .25 mm, además de que es el medio de comunicación con la máquina de prototipado rápido para la impresión de las piezas. La máquina utilizada fue la DIMENSION SST que



trabaja mediante la tecnología de Modelado de Deposición por Fusión (FDM).

❖ SOPORTE DE LA PISTOLA ROCIADORA

El soporte está comprendido por una pieza metálica hecha de aluminio con un espesor de 10 mm en todo su perímetro, la cual cuenta con diferentes perforaciones que están destinadas a la sujeción tanto de la carcasa de automatización como también de la misma al brazo mecánico (MOTOMAN). Dicha pieza fue fabricada en una maquina CNC modelo VMC 300 que es un centro de maquinado (ver lámina en apéndice).

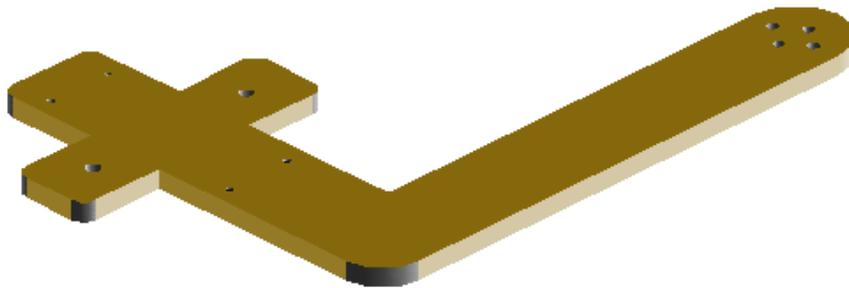


Figura 4.1. Soporte de la Pistola Rociadora

Ésta pieza fabricada al montarse y al entrar en funcionamiento se observó que no sufrió ningún tipo de deformación, vibración o afectación.



Figura 4.2 Soporte de la Pistola Rociadora unida al brazo mecánico

❖ CARCASA DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN

- COMPARTIMIENTO DE LA BOBINA DEL ACCIONADOR DEL GATILLO

El material de fabricación de ésta pieza fue ABS el cual tiene propiedades mecánicas apropiadas, además de tener la característica primordial de que es un material muy ligero. Ésta pieza soporta dos elementos los cuales son el soporte del motor accionador de la válvula para la apertura de combustible y a su vez se conecta al sistema de accionamiento del gatillo. Se realizaron pocas modificaciones al diseño primario lo que indica que fue un producto bien desarrollado (ver plano en el apéndice).

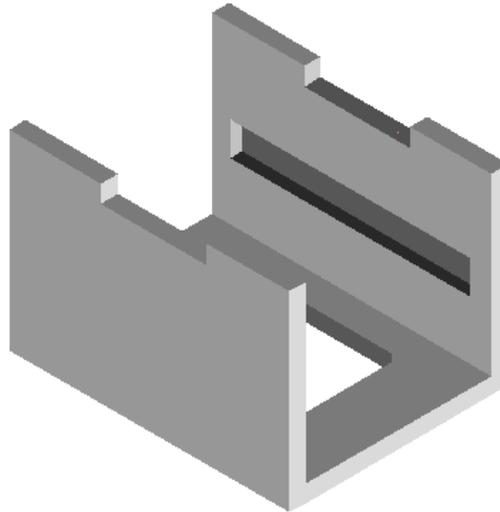


Figura 4.3. Compartimiento de la bobina del accionador del gatillo

- ACTUADOR DEL GATILLO

Esta pieza se realizó del mismo material antes mencionado y se sujetó a una de las piezas de la armadura de la bobina que accionará al gatillo. Además, se le agregó un tornillo el cual sirve como un ajustador para calibrar la distancia entre el gatillo y el actuador, para con ello poder obtener un mejor resultado a la hora del accionamiento del mismo, así también para tener afluencia adecuada de material de proyección dentro del proceso (ver plano en el apéndice).

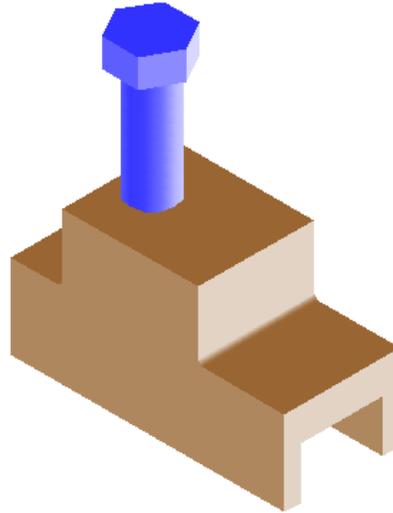


Figura 4.4. Actuador del Gatillo

- SOPORTE DEL MOTOR ACCIONADOR DE LA VÁLVULA DE GAS

El material de ésta pieza es el mismo utilizado con anterioridad en la carcasa, el cual demostró un buen comportamiento a las deformaciones plásticas. En este caso no hubo necesidad de modificar dicho elemento (ver plano en el apéndice).

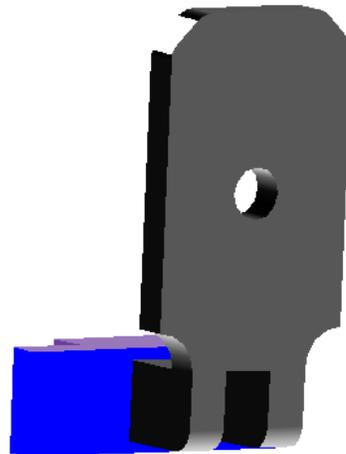


Figura 4.5. Soporte del motor accionador de la válvula de gas



- BRAZO ACCIONADOR DE LA VÁLVULA DE GAS

No mostró ningún problema al efectuar su trabajo soportando la fuerza aplicada sobre ella para el accionamiento eficaz de la válvula de apertura de gas, ni para el barrenado efectuado en el extremo donde actúa el motor, el cual tiene un torque bastante fuerte para poder realizar dicha tarea (ver plano en el apéndice).

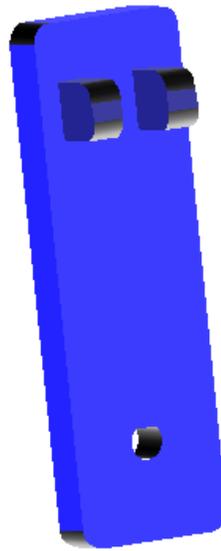


Figura 4.6. Brazo accionador de la válvula de gas

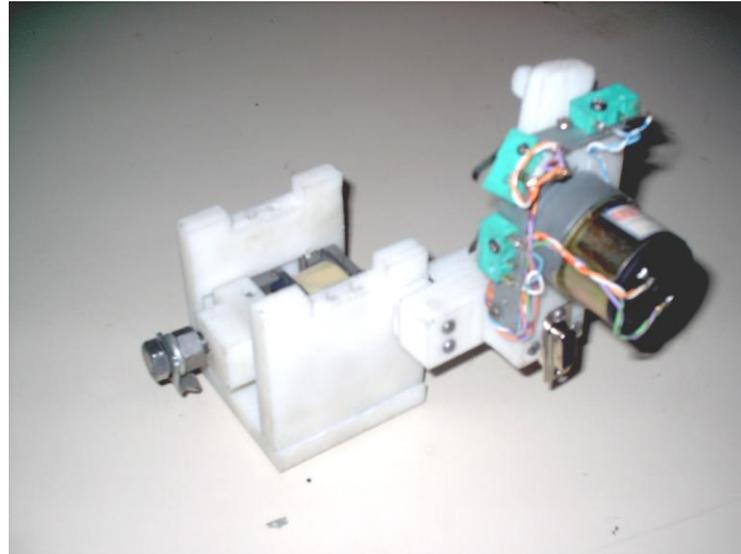


Figura 4.7. Ensamble completo de la carcasa del sistema de automatización

4.3 SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN (ELECTRÓNICA) DEL PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA

Para lograr la automatización del proceso se realizó lo siguiente:

1. Para la apertura de la válvula se utilizó un motoreductor de corriente directa con el torque suficiente para la apertura de ésta.
2. Para el accionamiento del gatillo de la pistola rociadora se utilizó una bobina de disparo perfectamente acoplada.
3. Para la chispa que producirá el encendido del gas se utilizó un sistema eléctrico del tipo resistencia con recubrimiento cerámico.

El diagrama de alambrado para el circuito total, así como sus conexiones quedaría como se muestra a continuación.

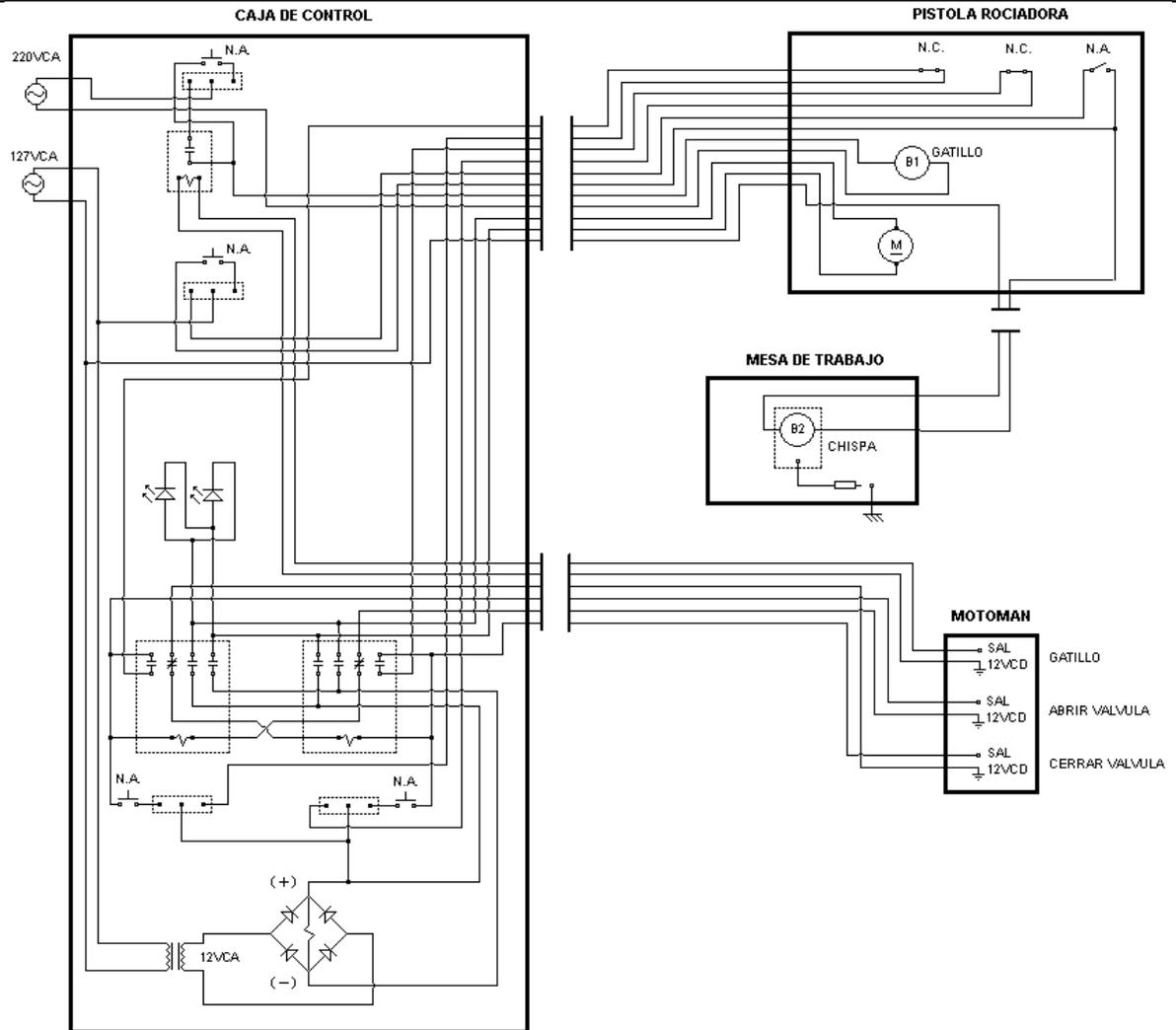


Figura 4.8. Diagrama de alambado general

Todos estos elementos fueron diseñados para su automatización en modo manual o automático. Esto, con la finalidad de poder realizar pruebas, ajustes pensando que se quiera realizar mantenimiento a las piezas siempre y cuando el sistema se encuentre colocado en modo manual. A continuación, se describen los procesos utilizados para la automatización.



- SISTEMA DE ENCENDIDO DEL MOTOR

Se realizó un circuito con componentes e ideas básicas que permitiera el accionamiento tanto manual como automático de un motor para la apertura de la válvula.

Material utilizado.

- 2 relevadores de 4 polos, con bobina 24 VCD
- 1 transformador 127 VCA / 12-24 VCD 2 Amp
- 4 diodos 1N4001
- 1 Capacitor
- 1 Resistencia
- 2 Leds
- 2 botones NA
- 2 switches ON-OFF-ON, 3 polos, 2 tiros
- 2 switches NC
- 1 tablilla soldable
- 1 Motoreductor 12VCD
- Cable

Los componentes fueron conectados como se muestra en el diagrama de control siguiente.

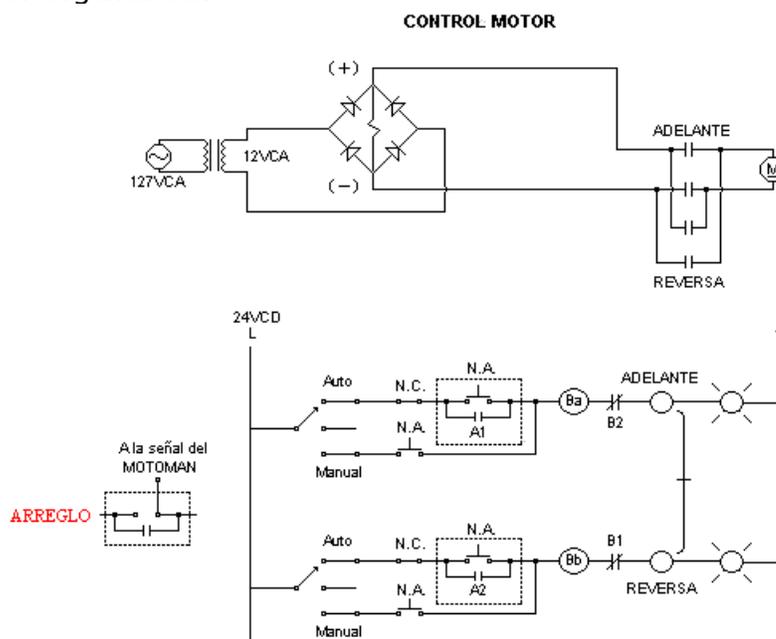


Figura 4.9. Diagrama de Control para Motor



Se utilizaron 2 switches ON-OFF-ON, uno para el modo manual o automático del motor en el sentido horario y otro switch para el modo manual o automático del motor en el sentido inverso. Hay que recalcar que el sistema debe funcionar en modo manual o automático, no combinados ya que ello provocaría el mal funcionamiento de éste.

A continuación se describe el funcionamiento de los 2 modos en los que se puede utilizar el circuito mencionado.

Modo automático

- Apertura de la válvula

Se entregan 24 VCD por 1 segundo aproximadamente simulando un botón de arranque NA (ARREGLO que se observa en la figura 4.2.2) proporcionados por el control del MOTOMAN directamente hacia el relevador 1, el cual nos proporcionará el movimiento del motor hacia el sentido horario (apertura de válvula). Estos 24 VCD hacen que la bobina del relevador se accione y con ello enclave el contacto auxiliar (NA) provocando con esto el libre flujo de la corriente hasta que el botón de paro sea presionado (NC), el cual está instalado en uno de los extremos de la válvula de encendido (ver figura 4.2.7). Al permanecer enclavada la bobina permitirá que los contactos conectados a los 12 VCD proporcionados por el transformador de 12 VCD utilizados para el funcionamiento del motor, tengan el libre flujo y con esto nos proporcionen el movimiento del motor y a su vez que el led indicador encienda. Como se puede apreciar, el contacto NC del relevador 2 está conectado al primer ciclo, esto con la finalidad de que no entren los 2 relevadores al mismo tiempo y con ello no se produzca ningún corto en el sistema, actuando como protección.

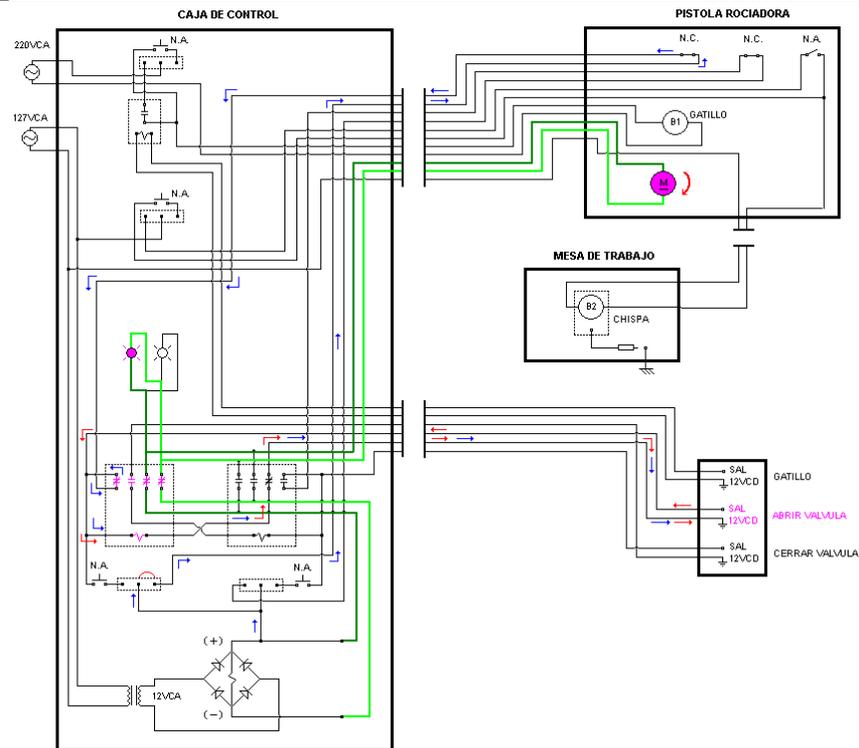


Figura 4.10. Diagrama de Apertura de Válvula Automático

- *Cierre de válvula*

Para el cierre de la válvula es utilizado el relevador 2 con el mismo proceso que el explicado anteriormente, solo que en éste en sus contactos se tiene invertida la polaridad en la conexión del motor, para que con ello éste se mueva en sentido anti horario.

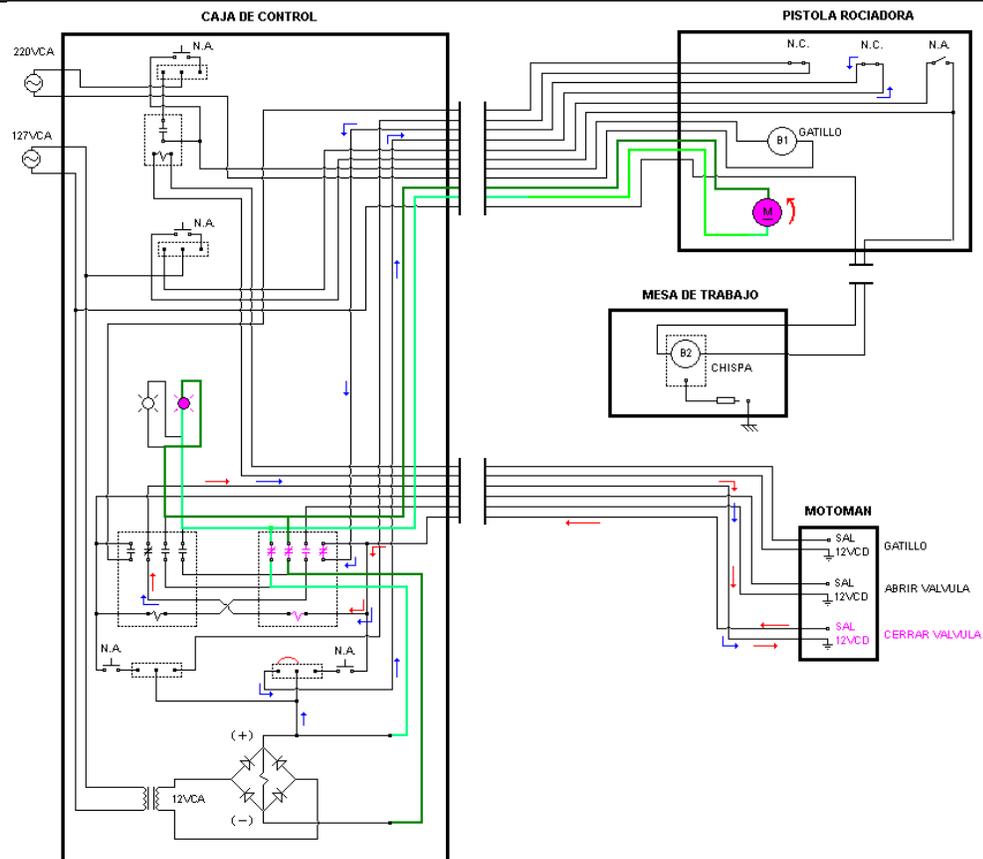


Figura 4.11. Diagrama de Cierre de Válvula Automático

Modo Manual

- Apertura de válvula

Se utilizó un puente que comprende desde los 24VCD del transformador del motor hasta el contacto auxiliar NC del Relevador 2. Entre ellos se conectó un botón NA para poder proporcionar los pulsos que se utilizarán para el cierre de la bobina del relevador 1 y con ello hacer girar al motor en sentido horario para la apertura de la válvula.

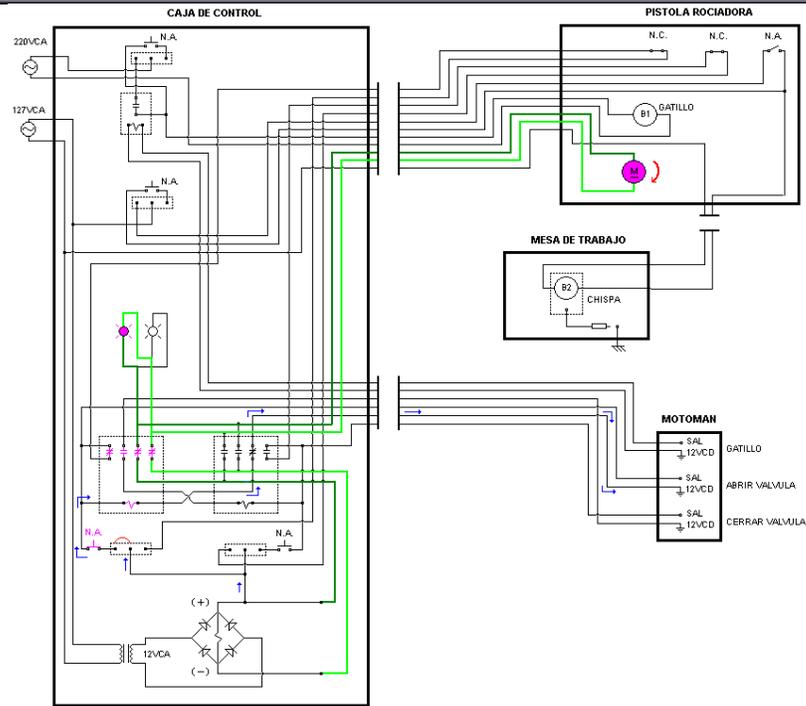


Figura 4.12. Diagrama Apertura de Válvula Manual

- *Cierre de válvula*

Es el mismo arreglo para el cierre de la válvula, solo que en el relevador 2 se invierte la polaridad de sus contactos para el movimiento del motor en sentido antihorario.

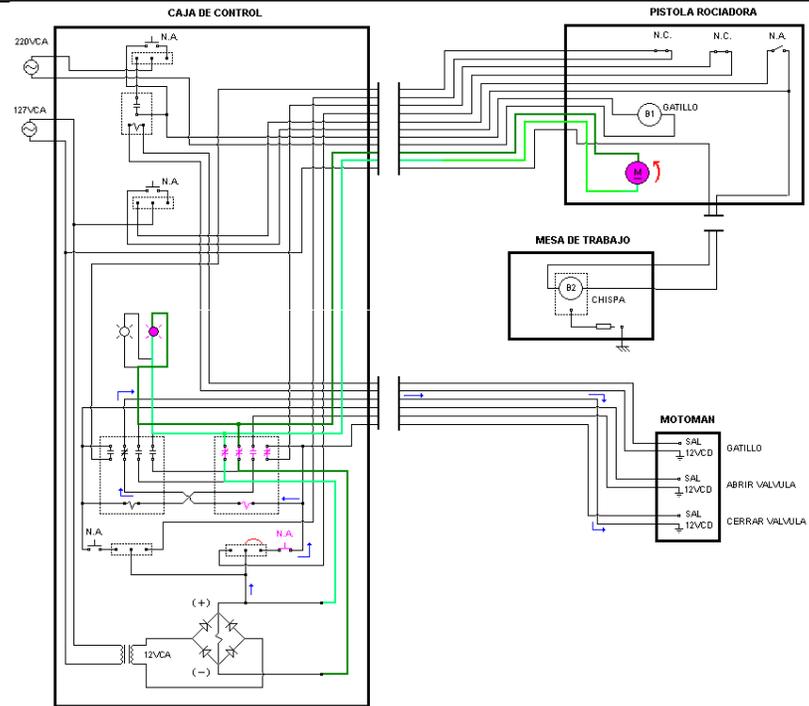


Figura 4.13. Diagrama Cierre de Válvula Manual

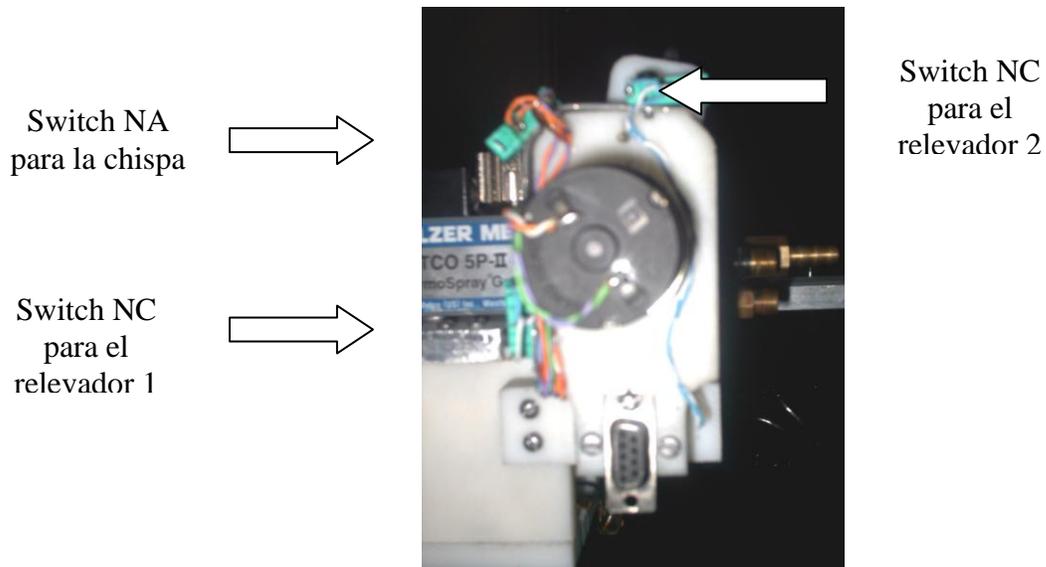


Figura 4.14. Acoplamiento del motoreductor a la carcasa de automatización



Es importante hacer mención que para el accionamiento de los switches se utilizaron placas curvas, esto con el propósito de que no se trabaran a la ida o al regreso del brazo accionador de la válvula de gas y con ello evitar el mal funcionamiento de la automatización.

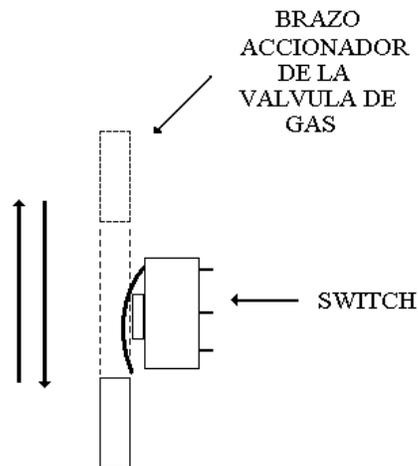


Figura 4.15. Accionamiento de switch

- SISTEMA DE ACCIONAMIENTO DEL GATILLO

Este sistema fue pensado para su utilización de modo manual y automático por medio de un switch ON-OFF-ON, como en el caso del accionamiento del motor.

Material utilizado.

- 1 Armadura de hierro de tipo contactor tamaño 0
- 1 bobina 220V
- 1 relevador 24 VCD 1 polo 1 tiro tipo NA
- 1 botón NA
- 1 switch ON-OFF-ON
- Cable

A continuación, se observa el diagrama que se utilizó para lograr el accionamiento de la bobina de disparo.

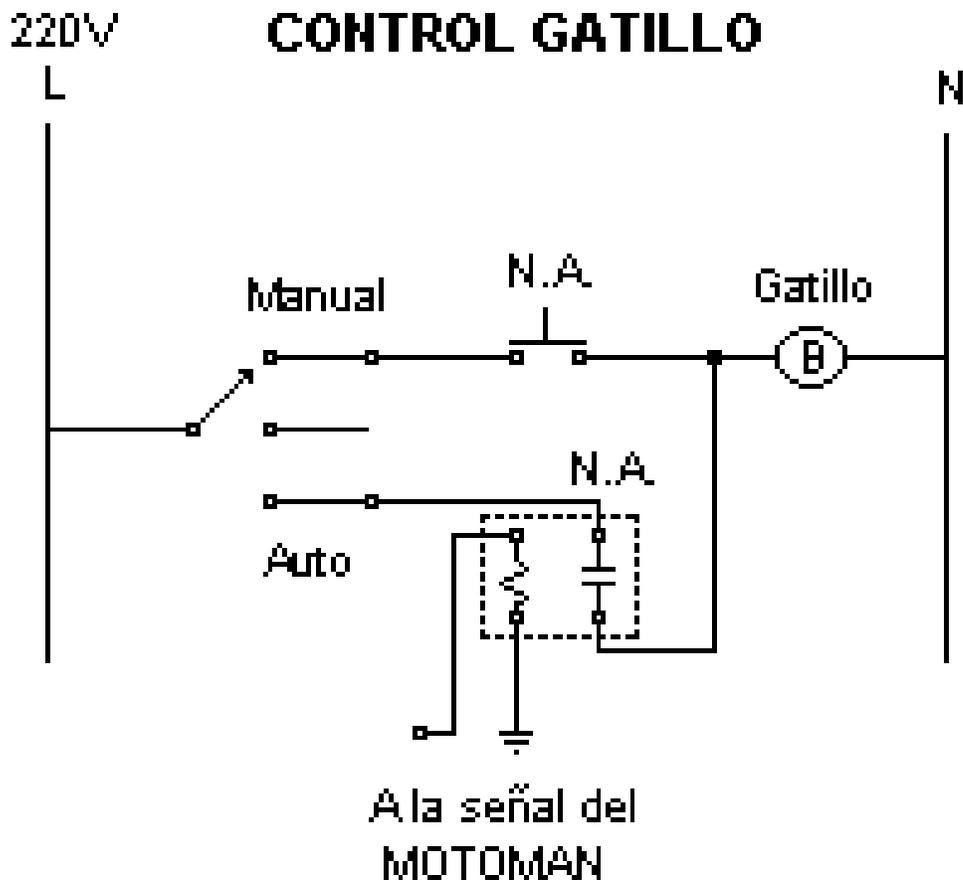


Figura 4.16. Diagrama Control de Gatillo

El sistema funciona de la siguiente forma.

Modo Automático

Se conecta el relevador al control del MOTOMAN de tal modo que al proporcionar 24 VCD de éste al relevador, éste se accione y permita que su contacto NA se cierre. Uno de los extremos del contacto NA es conectado a 220VCA que es el voltaje que necesita la bobina para poder accionarse. Una entrada de la bobina se conecta al extremo sobrante del contacto NA del relevador y la otra entrada de la bobina se conecta a 220V para cerrar con ello el circuito.

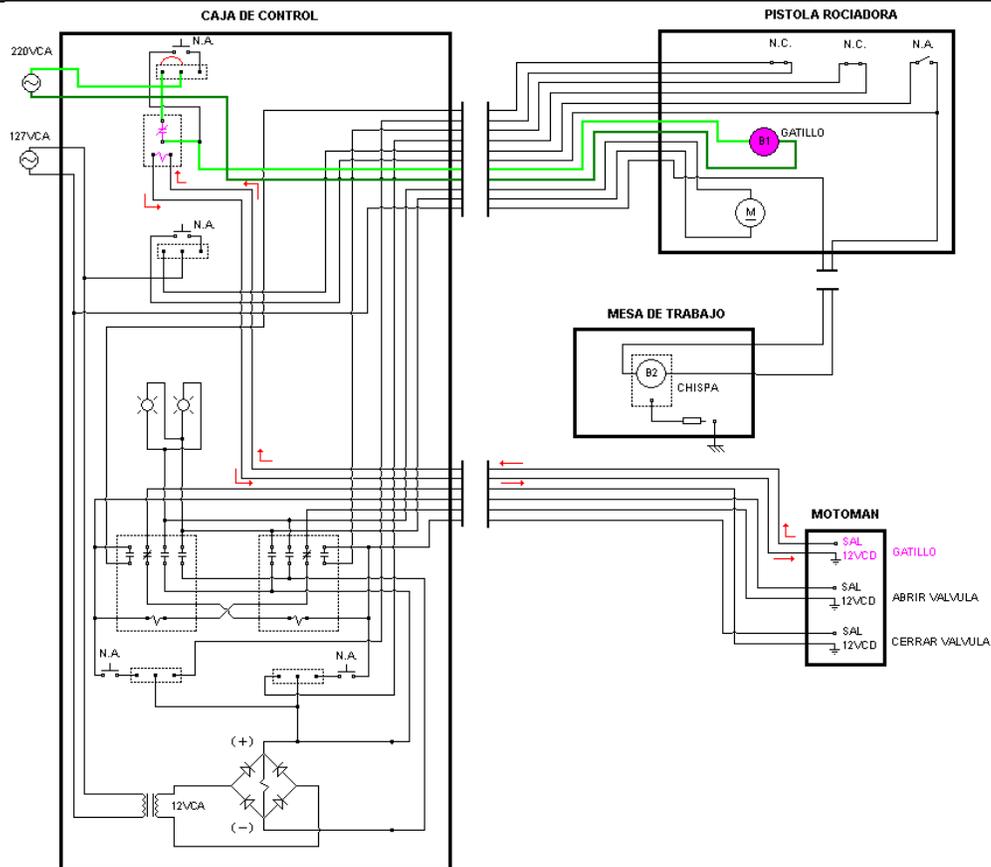


Figura 4.17. Diagrama Apertura de Gatillo Automático

Modo Manual

Se conecta un extremo del botón NA a 220V y el otro extremo se conecta a una entrada de la bobina de disparo cerrando con esto el circuito al conectar 220V a la entrada sobrante de la bobina.

Fue necesario colocar un cableado con un calibre mayor que el normalmente utilizado en las conexiones anteriores debido a que el voltaje a utilizar es mayor y con ello nos permita el funcionamiento óptimo del sistema.

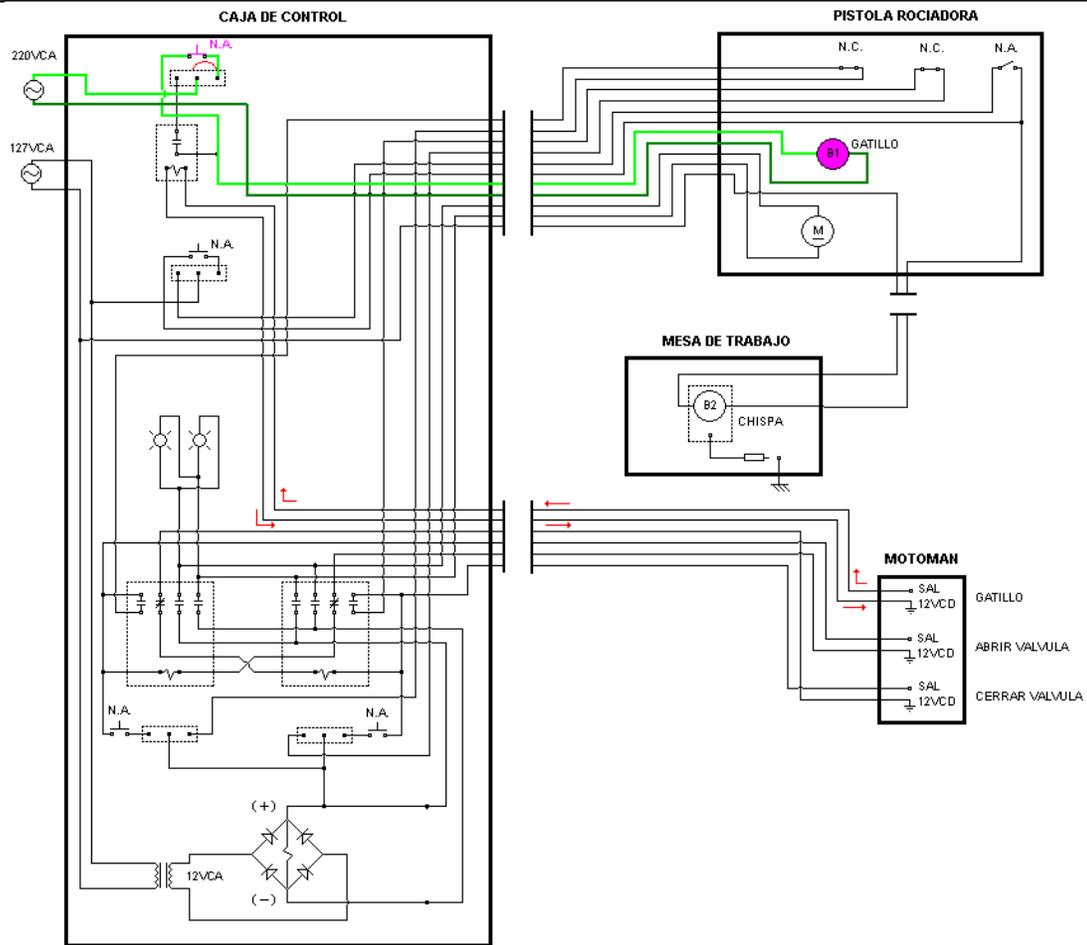


Figura 4.18. Diagrama Apertura de Gatillo Manual

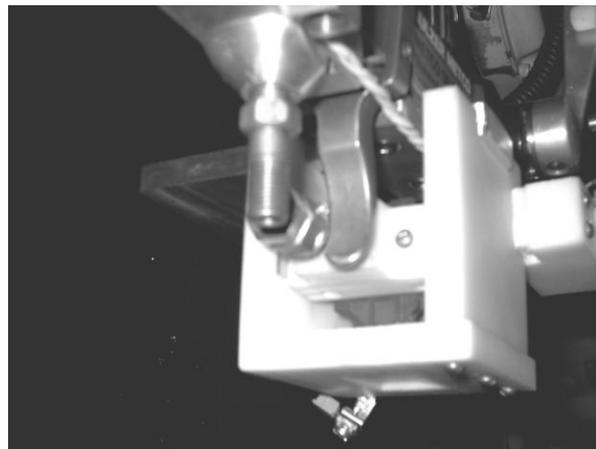


Figura 4.19. Acoplamiento de la Bobina de Disparo



- SISTEMA DE ENCENDIDO DEL COMBUSTIBLE

En este sistema se utilizó la bobina productora de la chispa que generalmente se observa instalada en las estufas domésticas de encendido electrónico, en donde el electrodo es colocado en la mesa de trabajo y se dirigirá a la boquilla de la pistola para el encendido del gas.

Material utilizado.

- 1 kit de encendido electrónico
- 1 electrodo
- 1 botón NA
- 1 switch NA
- 1 switch ON-OFF-ON
- Cable

A continuación se muestra el diagrama para el accionamiento de este sistema.

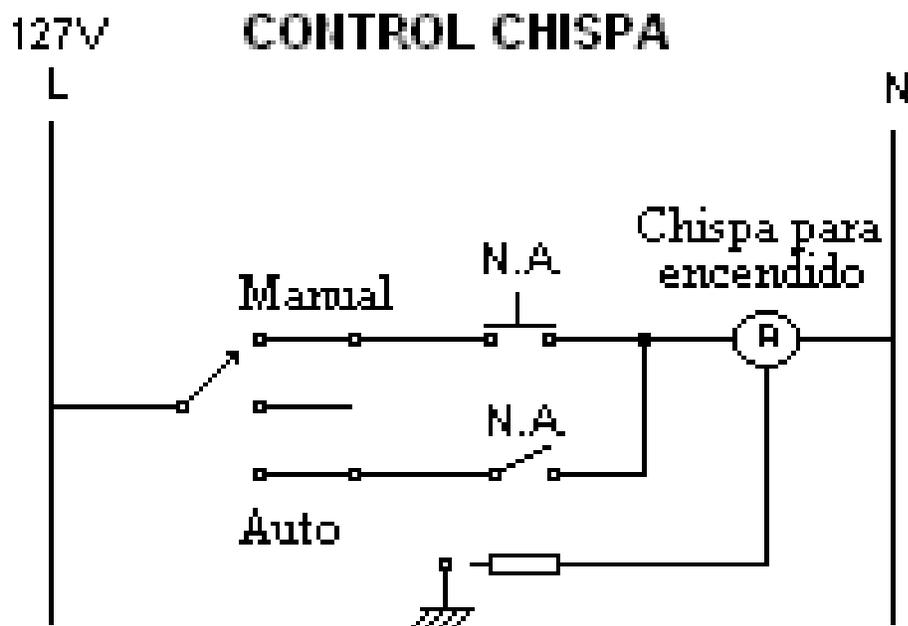


Figura 4.20. Diagrama Control de Chispa

Como se puede observar en el diagrama de alambrado, se acopló un switch ON-OFF-ON que hará la transición de modo manual o automático. Estos procesos se describen a continuación.

Modo Automático

Se instaló un switch NA a la carcasa de automatización de la pistola (ver figura 4.2.7) de tal forma que en el transcurso del sistema de apertura de la válvula éste se accione y permita el paso de 127VCA hacia el transformador que proporcionará la chispa, cerrando con ello el circuito y creando a su vez la chispa por medio de un electrodo colocado en la mesa de trabajo.

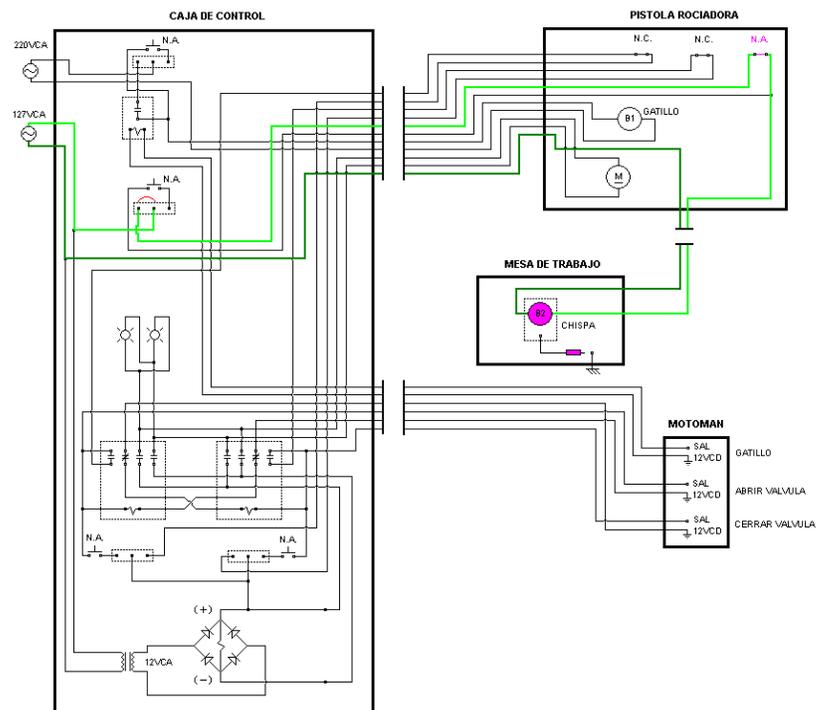


Figura 4.21. Diagrama Activación de Chispa Automático



Modo Manual

Se colocó un botón NA que suplirá al switch NA colocado en la carcasa de automatización de la pistola y con ello el sistema realizará las mismas funciones que en modo automático solo que por medio del botón NA que cerrará el circuito.

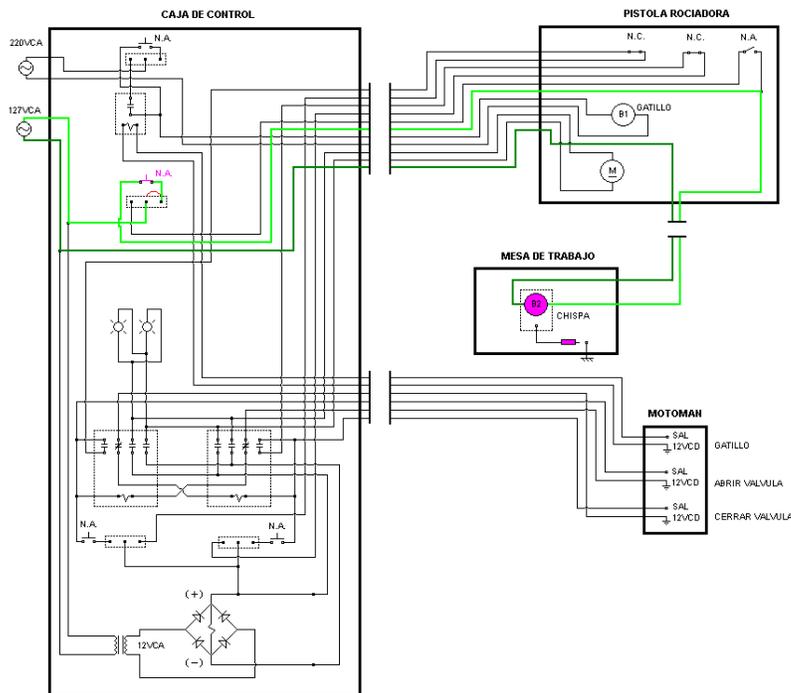


Figura 4.22. Diagrama Activación de Chispa Manual

El circuito en conjunto se colocó dentro de una caja con arreglos por medio de la cual se realizará el proceso de control de cada uno de los componentes para la automatización. Esta caja se recomienda sea colocada al lado del sistema de control del MOTOMAN. Para su realización se utilizó el siguiente material.

- 1 Caja 30x25x10cm
- 1 Conector DB9 Macho
- 1 Conector DB9 Hembra
- 1 Conector DB25 Macho
- 1 Conector DB25 Hembra
- Cable multiconductor
- Cable bipolar (para 220V)



Figura 4.23. Caja de Control

La siguiente figura nos muestra cómo se encuentran colocados los botones y los switches de la caja de control.

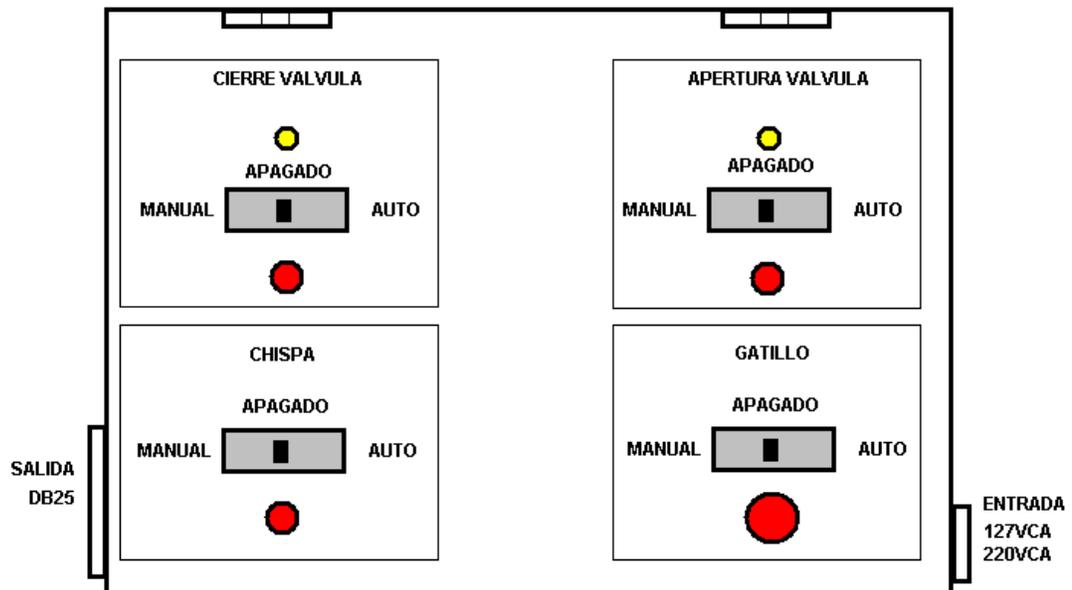


Figura 4.24. Mandos de la Caja de Control

Como se puede mostrar en la figura siguiente todos los componentes se distribuirán de la forma mostrada.

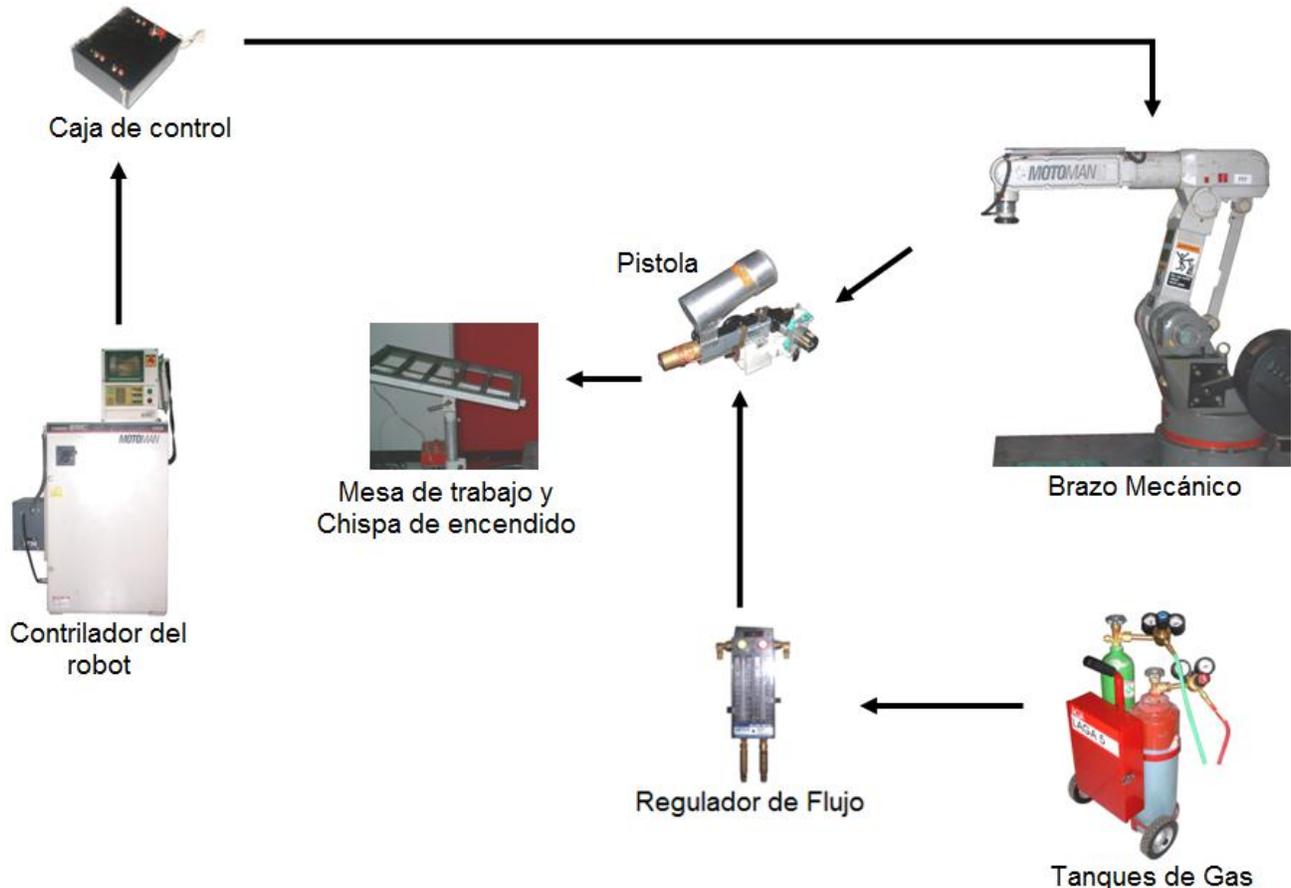


Figura 4.25. Conexiones Necesarias para la Automatización

- CÁLCULO DE TORQUE DEL MOTOR

Es importante saber la cantidad de torque necesario para el accionamiento de la válvula de apertura y cierre de gas de la pistola rociadora. Para ello se colocó una palanca con un pivote en el eje de apertura de la válvula de gas (ver figura 4.26). Esta palanca fue balanceada previamente para evitar al máximo el margen de error para el cálculo buscado. Se colocó en uno de los extremos de ésta un hilo y al final de éste se fue depositando peso hasta que la válvula se abrió.



Cat.	Voltaje Max (VDC)	Rango de voltaje (VDC)	Eficiencia máxima				Relación de engranaje
			Corriente (mA)	Velocidad (RPM)	Toque al arranque (gr*cm)	Torque nominal (gr*cm)	
GH12-1632T	12	4.5 - 12	275	57	11000	2200	100:1

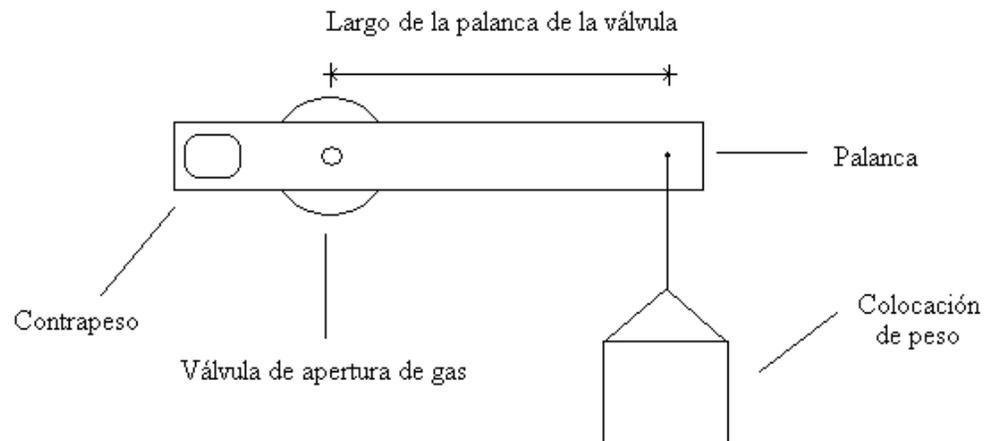


Figura 4.26. Palanca para Cálculo de Torque

Por medio del siguiente cálculo se logró obtener el par de fuerza inicial mínimo para lograr la apertura de la válvula dado en gr/cm y con ello poder seleccionar el motor que más se acoplara a nuestras necesidades.

$$\text{Fuerza de torque inicial} = \text{Peso (gr)} * \text{Largo (cm)}$$

$$\text{Fuerza de torque inicial} = 1,500 \text{ gr} * 6 \text{ cm}$$

$$\text{Fuerza de torque inicial} = 9,000 \text{ gr} / \text{cm}$$

Teniendo este dato se optó por seleccionar un motor de DC tipo reductor con las siguientes características.



Figura 4.27. Motoreductor DC

- FUNCIONES ALTERNATIVAS

En todo proceso es necesario un sistema de protección para evitar accidentes e incidentes. En este proyecto no fue acoplado un sistema de protección, pero de manera alternativa se puede colocar esto mediante el arreglo de la figura 4.28.

Material a utilizar.

- 1 botón tipo hongo c/cierre mecánico girar para soltar
- 1 block de contactos auxiliares con 2NA-2NC
- 1 lámpara indicadora
- Cableado

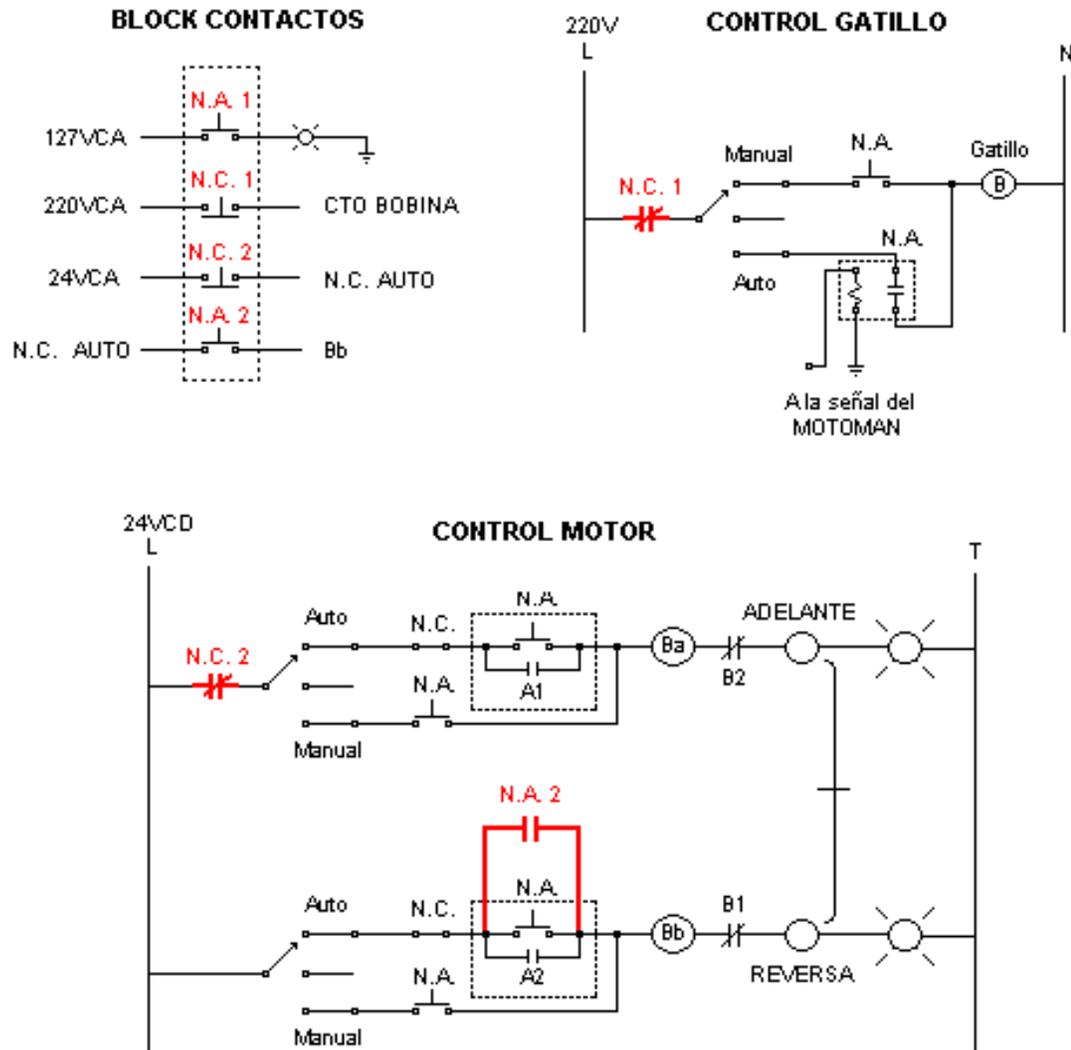


Figura 4.28. Diagrama de Paro de Emergencia

Como se puede observar con este arreglo se provoca el corte de los 220V para desactivar la bobina de disparo del gatillo, se fuerza al motor a regresar a su posición original para el cierre total de la válvula de apertura del gas sin que esta pueda abrirse de nuevo y a su vez se enciende la luz de paro de emergencia. Cabe recalcar que este sistema sólo se puede utilizar cuando el sistema se encuentra en modo automático. Debido a que se está utilizando un botón que queda enclavado, éste puede reestablecerse en el momento en que se repare la falla y poder continuar con el proceso de trabajo.



A continuación se muestran algunas imágenes del diseño acoplado al brazo mecánico y a la pistola.

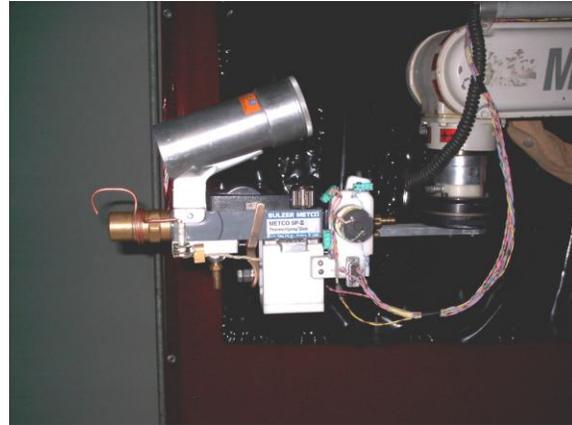
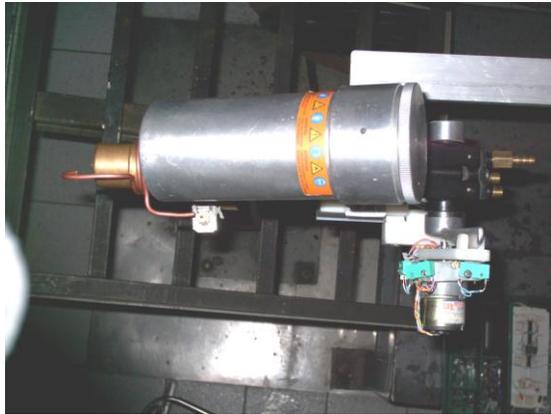


Figura 4.29. Vistas de acoplamiento lateral y superior



CAPÍTULO V

Desarrollo experimental

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirán y analizarán los resultados obtenidos en las pruebas que se realizaron sobre las probetas recubiertas con el equipo de proyección térmica por flama automatizado. Así mismo se revisará el comportamiento de cada uno de los componentes y el estado final de cada prueba para analizar las características de los recubrimientos depositados.

Las probetas se prepararon, en un primer término, bajo la aplicación de un proceso de granallado que generó la rugosidad requerida para poder tener un anclaje óptimo del material aplicado sobre la pieza de trabajo. Se cuidó que no se contaminara por ninguna sustancia que pudiera alterar el anclaje del recubrimiento.

En un segundo término se puede mencionar que se generaron varios programas estos se obtuvieron en base al desarrollo de trayectorias con el uso de software para maquinado en el cual muestra los tiempos de traslación mediante las consideraciones de velocidades de avance y que permitieron optimizar las trayectorias realizadas en la deposición de los recubrimientos. Se llevaron a cabo diferentes estrategias de trayectorias para encontrar la más óptima considerando el mínimo tiempo y número de pasadas para poder recubrir las piezas.

Las estrategias utilizadas en las pruebas figuras 5.1a y 5.1 b, fueron las siguientes: barrido la pieza en un solo sentido, en forma de espiral, forma paralela, zigzag y en forma mórfica. Después de realizar las animaciones y simulación del proceso dio mejores resultados en cuanto a tiempo de proceso la estrategia zigzag. Aunado a esta simulación se realizaron las corridas con el brazo robot en vacío para la simulación de estas trayectorias y posteriormente con el equipo montado realizando la deposición se validó efectivamente que la estrategia en zigzag ofrece un menor tiempo de deposición y espesor uniforme, Tal como se observa en la figura 5.2a y 5.2 b.

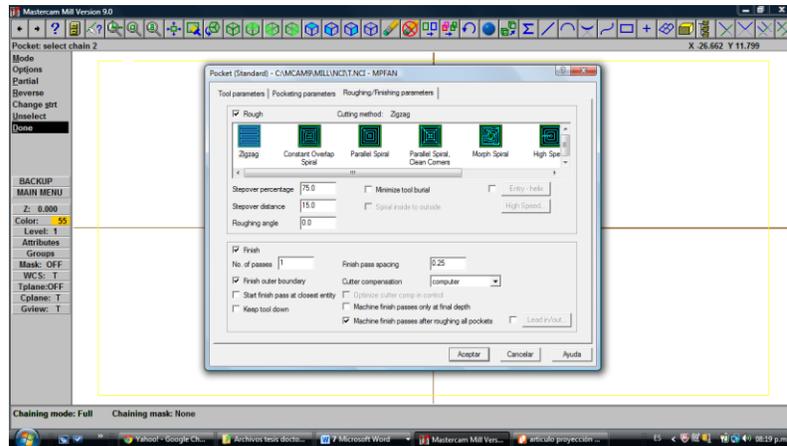


Figura 5.1a. Simulación de trayectorias para ser efectuadas por el robot

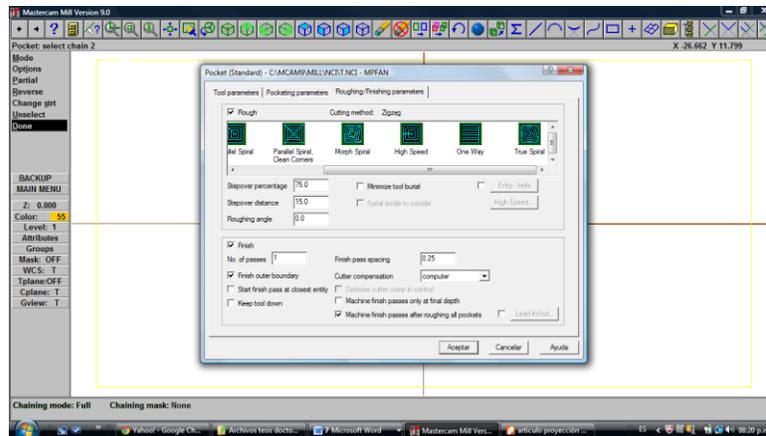


Figura 5.1b. Simulación de trayectorias seleccionadas para ser efectuadas por el robot

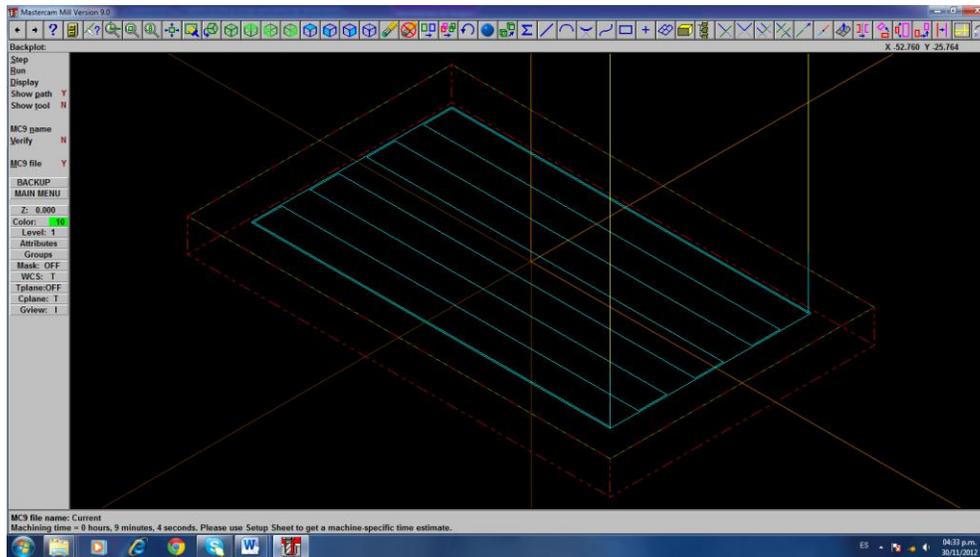


Figura 5.2a. Simulación de trayectorias en zigzag seguidas por el robot.

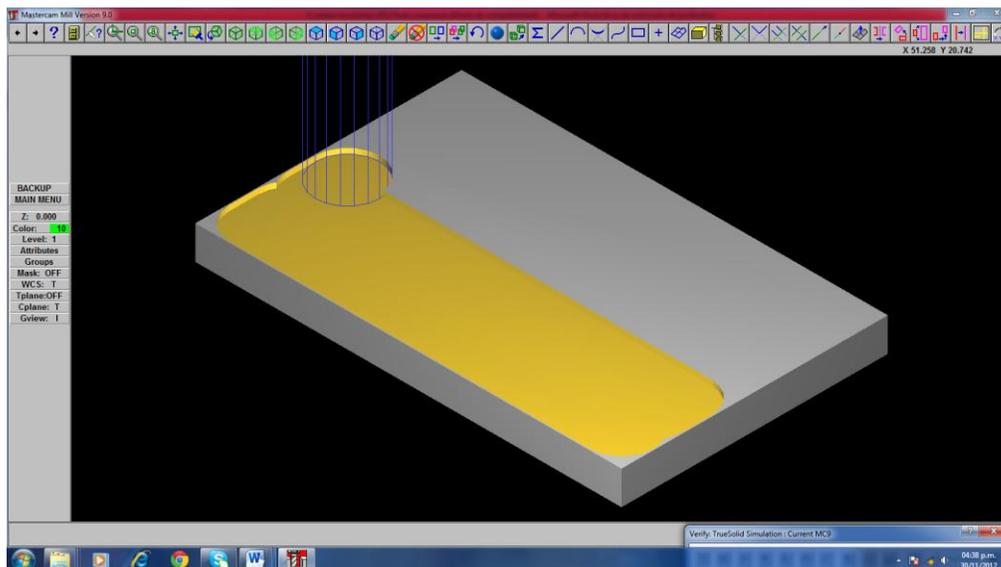


Figura 5.2b. Simulación de deposición de la trayectoria seguida por el robot.

En base a estas trayectorias de deposición se seleccionaron las que permitían una velocidad de deposición alta y espesor uniforme. En base a estos resultados se



seleccionaron dos programas que cubren un barrido de proyección vertical y otro horizontal (ver apéndice A y B del programa del robot) para la realización de la proyección en el módulo de control del brazo mecánico (MOTOMAN) y se obtuvieron los siguientes resultados, tomando en cuenta que se realizaron 10 probetas por cada programa.

- PROGRAMA 1

La característica primordial de este trabajo es que el barrido de la proyección que se realizó sobre las probetas fue de izquierda a derecha y viceversa en cuatro niveles de colocación. Se pudo observar que en una primera probeta se encontraron zonas con falta de material al realizar la proyección y en otras con exceso, lo que llevó a la corrección del programa en la velocidad de barrido de proyección, así como de colocación de la pistola rociadora para la descarga de material. Ver Figura 5.3

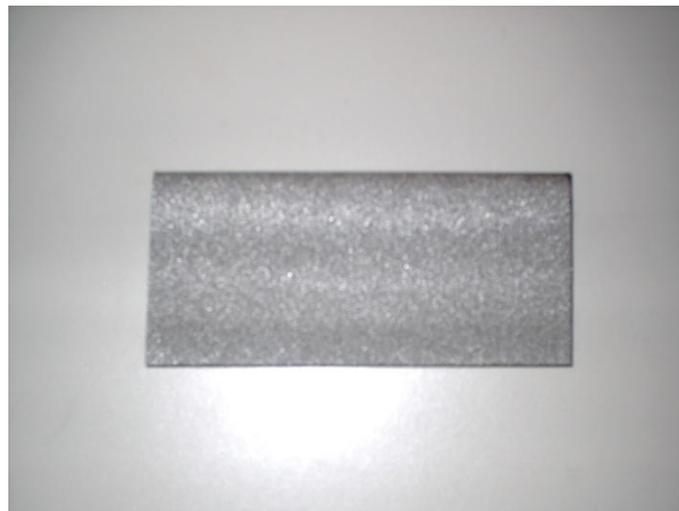


Figura 5.3. En la probeta se observan varias franjas oscuras producto de surcos donde no se aplicó el recubrimiento de forma homogénea

Una vez corregidos los pasos y trayectorias para la deposición y luego de haber agregado más material se encontró que la proyección respecto a las otras dos probetas existió un cambio considerable y visible en los recubrimientos. Se obtuvo una mejor colocación de partículas de material depositante tanto en la totalidad de la superficie como en el espesor de la capa de material agregado. Ver Figuras 5.4a y 5.4b.



Figura 5.4a. En la probeta se observa la eliminación de franjas negras con la disminución de surcos

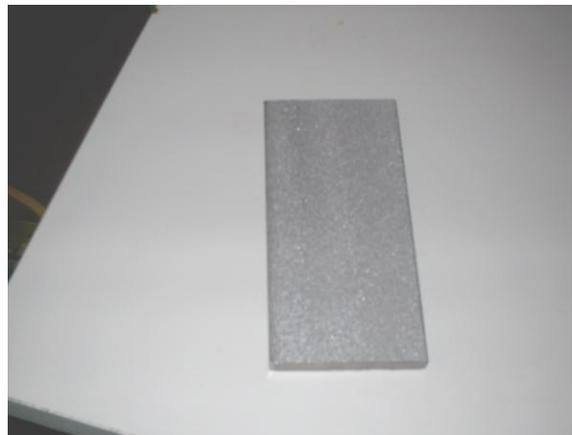


Figura 5.4b. En la probeta se observa la eliminación total de franjas negras indicio de espesor uniforme.

- PROGRAMA 2

En este programa cabe destacar el tipo de barrido que se genera para la proyección del material que es diferente al anterior. En este caso los pasos a seguir para la deposición de material se generan en el orden de arriba hacia abajo y viceversa con seis series de movimiento vertical para cubrir el área total de la probeta. En esta prueba se notó que el barrido era de una manera más uniforme, pero al igual que el programa anterior se encontraron zonas de bajo nivel de calidad, lo que conllevó a la corrección del programa para su mejoramiento hasta conseguir un espesor y recubrimiento uniforme como lo muestra la Figura 5.5.

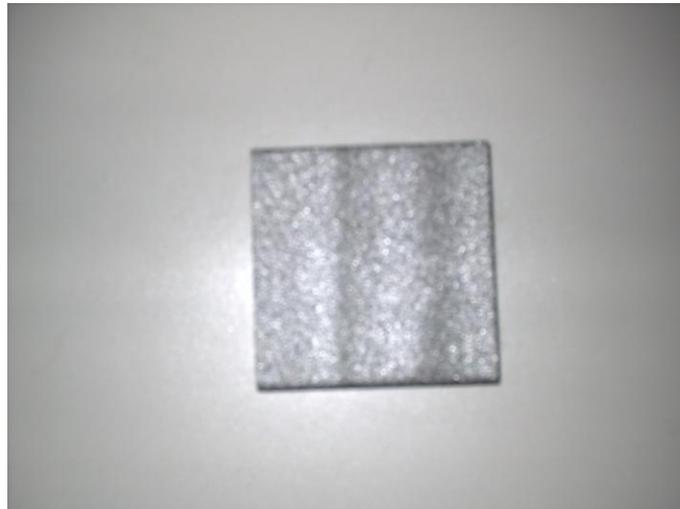


Figura 5.5. En la probeta se observan las líneas oscuras indicio de surcos.

Ya finalizadas las correcciones hechas al programa se realizaron las pruebas concernientes al proceso, encontrando que, efectivamente, hubo una mejora notable y se encontró falta de material en ciertas zonas (básicamente en el cambio de línea de proyección) del recubrimiento, lo cual indicó que este tipo de barrido provoca irregularidades en ciertas zonas ver figura 5.6a y para mejorar esta condición es necesario dar una pasada extra a la pieza lo que en términos de proceso de manufactura sería una pasada de acabado, esto permitió mejorar dichas áreas y obtener una superficie más homogénea como se observa en la figura 5.6b.

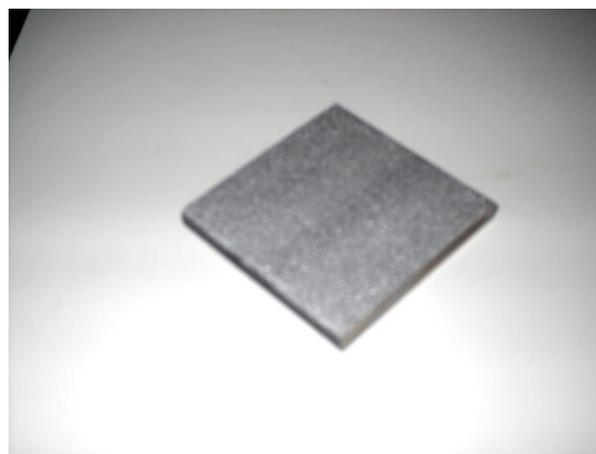


Figura 5.6a. Se observa la disminución de surcos.

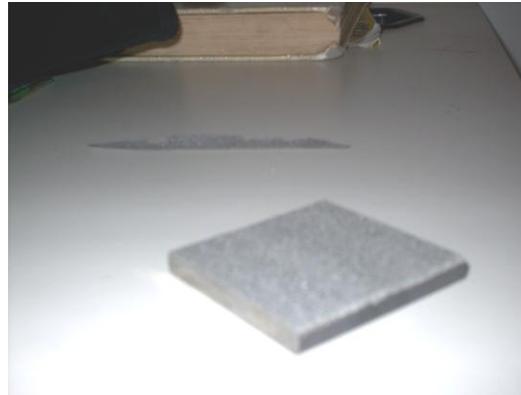


Figura 5.6b. Se observa un espesor uniforme sin surcos o hendiduras

Una vez que se terminaron las pruebas de los dos programas se compararon las diferentes probetas rociadas y se pudo determinar que el programa 1 es el más adecuado en la aplicación de material de aporte dentro de un proceso de proyección térmica, ya que entrega una mejor calidad de proyección en un menor tiempo de ejecución, con lo que se obtiene un ahorro considerable de combustibles, material de aporte, energía eléctrica y sobre todo un menor desgaste en las piezas de trabajo de la pistola rociadora y del brazo mecánico, es decir, un mejor aprovechamiento de los recursos y una menor intervención de mantenimiento a los equipos, lo que indica un proceso más eficaz.

5.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A continuación se menciona el proceso experimental subsecuente una vez probado el sistema de proyección térmica automatizado. Para la generación de los recubrimientos superficiales se realizaron una serie de recubrimientos a los cuales se les caracterizó mediante estudios metalográficos por medio de microscopía electrónica, pruebas de dureza y desgaste.

Como primera etapa, se utilizó un equipo de proyección térmica convencional tal como se muestra en la figura 5.7 lo cual permitió definir el proceso a seguir en la automatización.

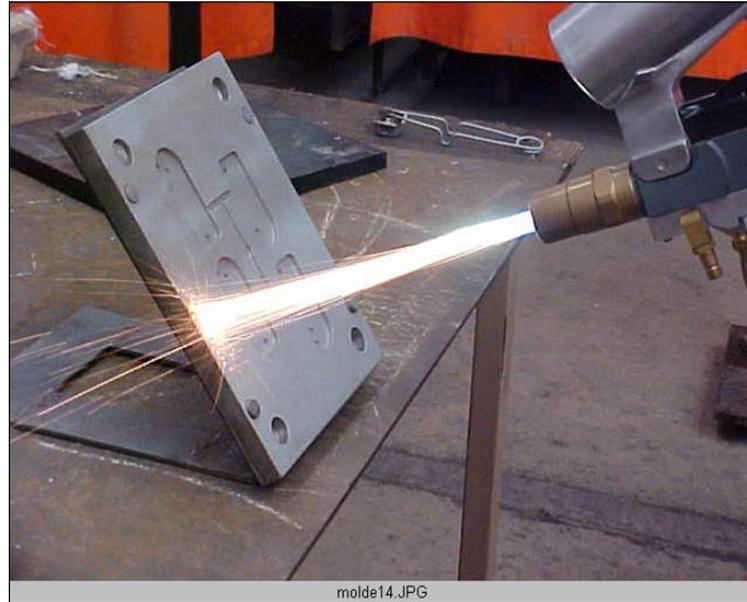


Figura 5.7 Proceso convencional de proyección térmica

Posteriormente, se realizaron pruebas de proyección con el equipo automatizado para la caracterización del patrón de rociado a fin de determinar las condiciones (parámetros de operación) que permitieran obtener el recubrimiento más homogéneo posible Figura 5.8.



Figuras 5.8. Proyección Térmica para la obtención del patrón de rociado



5.3 HUELLAS DE PROYECCIÓN.

Se tomaron diferentes huellas de proyección variando la distancia y la calibración de la válvula de control de flujo del polvo, con la finalidad de determinar el paso y la distancia más conveniente para el rociado térmico, las cuales se muestran en la tabla 5.1.

CALIBRACIÓN DE LA VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO.	DISTANCIA DE PROYECCIÓN		
	20 cm	25 cm	30 cm
16			
17			
18			

Tabla 5.1 Huellas de Proyección obtenidas en las condiciones indicadas

Se compararon las diferentes huellas (tabla 1) y se seleccionó la correspondiente a una distancia de 25 cm y una calibración de la válvula de control de flujo de 17²³, por tener una forma y espesor uniforme. Se tomaron medidas de esta huella determinando un paso de traslape de la pistola de proyección de 1 cm.

5.4 BANCO DE PRUEBAS

Se realizaron pruebas con el equipo a diferentes velocidades de avance en base a la simulación realizada con el software de CAM y de acuerdo a ello se realizaron y adecuaron las pruebas obteniendo buenos resultados con velocidades de 100 y 150 cm/min y se hicieron estudios de rugosidad, morfología superficial, espesor de la capa y análisis químico para obtener los datos comparativos y elegir la más óptima.

²³Huellas de Proyección.-Morfologías de los Splat



Para ello se llevó a cabo el diseño del experimento partiendo de las dimensiones de la mesa de trabajo y los datos obtenidos en la simulación y se procedió a realizar el rociado con los datos que a continuación se mencionan.

Parámetros de trabajo.

- a. Material de trabajo: Solera de Acero AISI 1018 de 5 cm de ancho por 8 cm de largo y espesor de 6.3 mm.
- b. Preparación de la pieza de trabajo: granallado de 15 minutos con óxido de aluminio malla 12, obteniendo una rugosidad $R_a = 11 \mu\text{m}$. La cual se mide mediante un rugosímetro, para lo cual se utilizaron diferentes probetas a diferentes tiempos variando de 1,3,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50 y 60 minutos para lo cual se tomó la lectura y se obtuvo la rugosidad promedio y esta fue la considerada para realizar las deposiciones. Cabe mencionar que al pasar los 40 minutos nuevamente se volvió a incrementar la rugosidad, esto se entiende de la siguiente manera, debido a que al lograr una rugosidad máxima esta se iba disminuyendo con el tiempo al seguir aplicando la presión y abrasivo constante distorsionando las crestas máximas conseguidas con el granallado y llegaba a una etapa en la cual nuevamente se volvían a incrementar estas crestas gracias a las condiciones de presión y aplicación de las partículas de óxidos de aluminio que se usaron como medio de elemento para granallar.
- c. Polvo metálico: (Ni, Cr 10, B 2.5, Fe 2.5, Si 2.5, C 0.15). a depositar
- d. Presión de los gases: Acetileno 0.5 Bar, Oxígeno 2 Bar
- e. Presión del aire: 2.5 Bar.
- f. Distancia de proyección: 25 cm.
- g. Tiempo de proyección: 3 min.
- h. Velocidad: 100 ó 150 cm/min.
- i. Recorrido vertical de la pistola: 1 cm por paso.



Rugosidad.

Se realizó la prueba de deposición con valores de rugosidad de $R_a = 22.5 \mu\text{m}$ para una velocidad de proyección de 100 cm/min, y una $R_a = 17.2 \mu\text{m}$ para una velocidad de 150 cm/min. Se optó por esta última velocidad (150 cm/min) ya que los resultados de la rugosidad para estas pruebas eran menores y la uniformidad de la capa era más homogénea y el espesor constante. También se llegó a considerar aumentar la velocidad de avance ya que como se había observado que al aumentar la velocidad de avance la deposición era más rápida y la rugosidad disminuía, pero también se pudo observar en las pruebas que hay un límite de avance permisible para la deposición, se aprecia que al ir incrementando la velocidad el traslape de la boquilla de la pistola de proyección empieza a tener un defasamiento, a tal grado que con un avance de 200 cm/min sobrepasa el diámetro de la huella lo cual genera hendiduras o surcos en la pieza, es por ello que a 150 cm/min se tiene aproximadamente un traslape del 80 % de la huella lo cual permite que el espesor sea más constante al evitar que los Splats o gotas se amontonen en las diferentes capas que genera la deposición del recubrimiento.

5.5 MORFOLOGÍA SUPERFICIAL.

En la prueba de rociado térmico a una velocidad de 150 cm/min se tomaron micrografías de la superficie en un microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL20, a distintos aumentos, donde se puede observar la proyección del recubrimiento metálico sobre el material de trabajo y la porosidad.

Se puede observar en la figura 5.9 la presencia de partículas de forma esférica que no fundieron quedando adheridas al substrato. En la figura 5.10 se puede observar la porosidad (puntos negros) y una imagen que permite percibir la adherencia al substrato de la aleación de recubrimiento fundida.

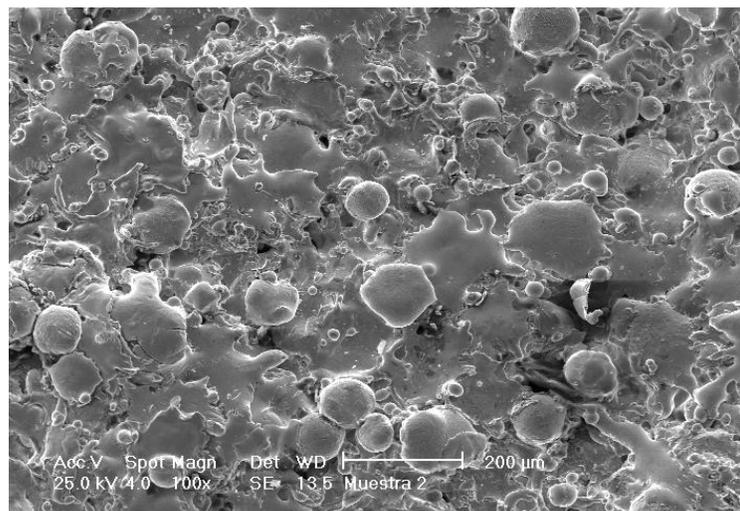


Figura 5.9 Micrografía de la superficie a 100x mostrando los Splats

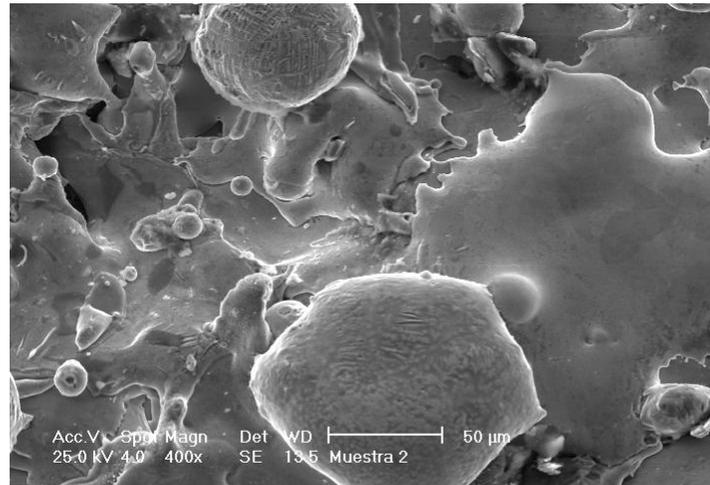


Figura 5.10 Micrografía de la superficie a 400x mostrando puntos de porosidad

ESPESOR DE LA CAPA.

En la prueba de rociado térmico a una velocidad de 150 cm/min se hicieron medidas del espesor de la capa en diferentes puntos. Como se puede observar en la figuras 5.11, el espesor en un punto máximo de la capa, es de 1.19 mm.

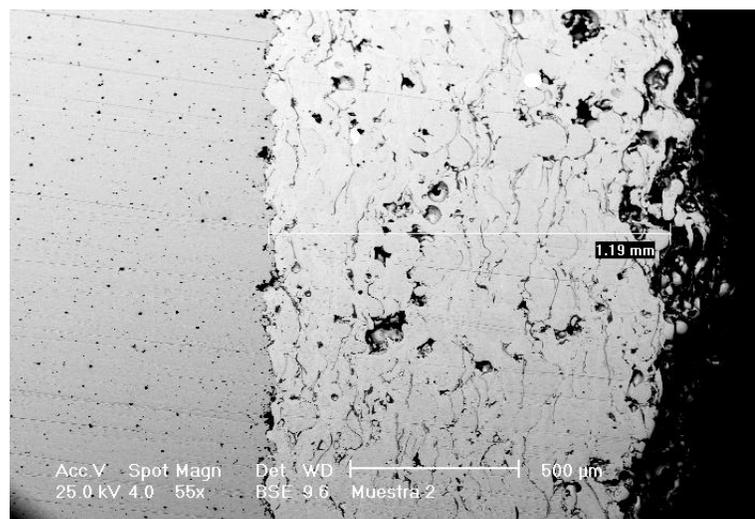


Figura 5.11 Espesor de 1.19 mm en un punto máximo de la capa

Se realizaron pruebas de microdureza a diferentes probetas y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 5.2



Probeta	Dureza Vickers Material base (1018) Cerca de la unión	Dureza Vickers Recubrimiento Cerca de la unión	Dureza Vickers Material base (1018) Lejos de la unión	Dureza Vickers Recubrimiento Lejos de la unión
1	D =188 D =185 D =186 D =144 D =174 Promedio D =175.5	D = 310 D =623 D = 549 Promedio D =494	D =232 D =232 D =232 D =232 Promedio D =232	
	D = 153 D =150 D =161 D =151 D =154 Promedio D =153.8	D =566 D =299 D =509 D =441 D =644 Promedio D =491	D =193 D =157 D =177 D =150 D =172 Promedio D =169.8	D =532 D =715 D =514 D =707 Promedio D =617
2	D =161 D =168 D =161 Promedio D =163.3	D = 310 D =232 Promedio D =271	D =161 D =168 D =161 Promedio D =163.3	D =701 D =739 D =644 Promedio D =694.6
	D = 168 D =169 D =175 D =166 D =174 Promedio D =170.4	D =603 D =391 D =349 D =501 D =509 Promedio D =470	D =154	D =386 D =441 D =286 D =232 D =362 Promedio D =341.4
3	D = 161 D = 178 D =148 D =169 Promedio D =164	D =655 D =543 D =633 D =516 Promedio D =586	D =183 D =177 D =175 D =175 Promedio D =177.5	D =644 D =460 D =593 Promedio D =565.6
	D =143 D =175 D =210 D =161 D =169 Promedio D =171.6	D =321 D =752 D =473 D =466 Promedio D =503	D =195 D =172 D =168 D =199 D =154 Promedio D =177.6	D =752 D =466 D =453 D =593 Promedio D =566
4	D =150 D =133 D =143 D =138 Promedio D =141	D =466 D =412 D =480 D =447 Promedio D =451.25	D =148 D =157 D =148 D =154 Promedio D =151.75	D =487 D =441 D =306 Promedio D =411.3
5	D =136 D =116 D =125 D =137 Promedio D =128.5	D =613 D =473 D =310 D =540 Promedio D =484	D =185 D =157 D =162 D =157 Promedio D =165.25	D =345 D =453 D =473 D =381 Promedio D =413

En la tabla 5.2 se observar que la dureza en el recubrimiento es mayor que en el material base



Se realizaron rociados térmicos con diferentes tiempos, con los mismos parámetros de la prueba anterior para una velocidad de 150 cm/min. Se midió el espesor de la capa, obteniendo los resultados de la tabla 5.3 y la gráfica correspondiente a la figura 5.12. Esto, con el fin de obtener el parámetro donde ya no hay adherencia del recubrimiento y por lo tanto determinar el espesor máximo que se puede conseguir por esta técnica de proyección.

Espesor de la capa en mm	Tiempo de proyección en seg.
0	0
0.8	60
1.3	120
2.2	180
3.2 (Levantamiento de la capa)	280

Tabla 5.3 Prueba de rociado de espesor vs tiempo

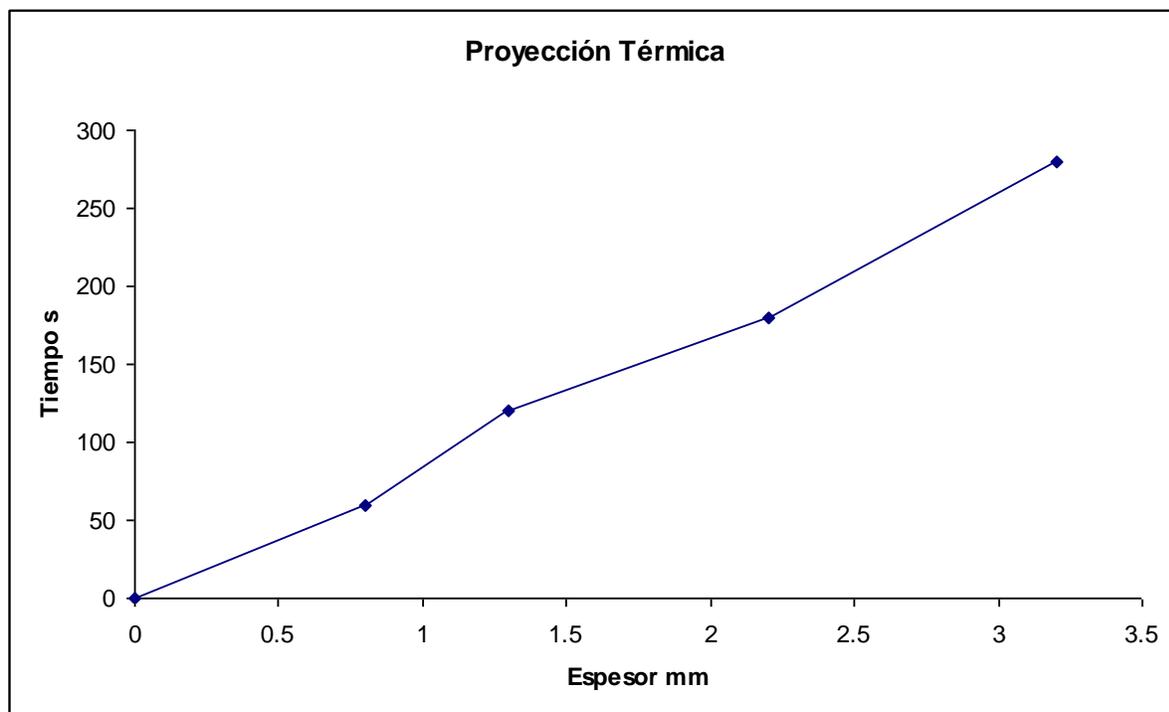


Figura 5.12 Gráfica espesor-tiempo

Se realizaron diferentes rociados en aceros de bajo contenido de carbono con los parámetros obtenidos en la calibración de la huella de rociado, obteniendo así el patrón de rociado y el recubrimiento más homogéneo, tal como se observa en la figura 5.13.

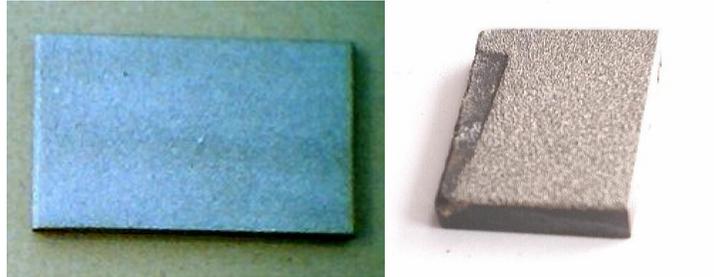


Figura 5.13 Recubrimiento obtenido en el proceso de rociado por flama automatizado

ANÁLISIS QUÍMICO POR MEDIO DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO.

La figura 5.14 muestra un análisis químico típico del recubrimiento obtenido mediante la proyección térmica del proceso automatizado, utilizando la microsonda asociada al microscopio electrónico de barrido, lo cual dio datos contundentes sobre la aleación depositada presentando un alto contenido de níquel y cromo.

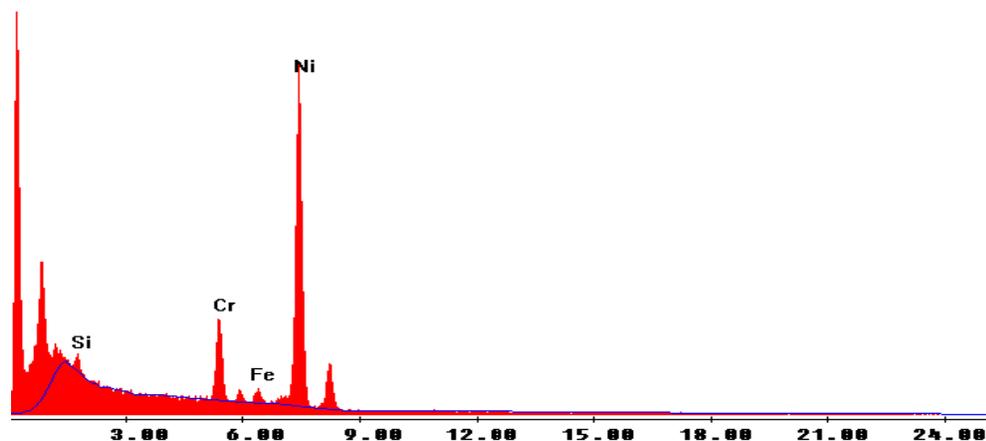


Figura 5.14 Análisis químico del recubrimiento



5.6 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE AUTOMATIZADO

El equipo de automatización del proceso se comportó inicialmente de una manera inestable. Debido a que existieron algunas deficiencias tales como conexiones mal colocadas y en algunos casos falso contacto, mala calibración de switches, entre otros. Sin embargo, se lograron detectar los errores y se corrigieron sin problema. Se reanudaron las pruebas demostrando con ello que ya no existía ninguna falla durante ni al final del banco de pruebas realizado. Todas las piezas se encontraron en óptimas condiciones y sin problemas ya que se pudo repetir el proceso constantemente sin ningún problema en la operación del equipo y sobretodo consiguiendo los recubrimientos con las características establecidas en la experimentación comentada.

Se efectuó un desmembramiento del equipo para realizar un estudio minucioso de cada una de las piezas para cotejar tanto las medidas de diseño como la apariencia física, logrando con ello verificar el estado final. Se obtuvo que no hubo modificación alguna y por lo tanto se determina que las piezas pueden estar libres de programas de mantenimiento correctivo continuo, únicamente se recomienda realizar verificaciones periódicas para así no tener pérdidas tanto económicas por la detención del proceso, como mermas en los equipos por accidentes ocasionados por la ruptura de una pieza en cuestión.

El brazo mecánico se comportó de una manera eficiente ya que se le llevó hasta sus límites de peso y trabajo no presentando ningún percance, lo que indica que se cubrió el cometido que era el de no sobre pasar el límite de gramaje de trabajo en la muñeca del brazo mecánico, ya que era la que indicaría si el peso que se tenía en el ensamblado del equipo era el correcto o estaba sobrado.

El proceso es uno de los más antiguos y ha seguido un desarrollo importante en los últimos años mejorando sus rangos de aplicación, así como los equipos de las diferentes técnicas de proyección, es importante recalcar que es el único proceso que nos entrega una gama amplísima de combinaciones de polvos metálicos y de otros tipos para recubrimientos, lo que permite lograr una generación de múltiples características en los materiales de aporte.



CAPÍTULO VI

Ensayos de desgaste de piezas revestidas mediante proyección térmica.

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirá el trabajo realizado para evaluar las propiedades al desgaste del recubrimiento Ni,Cr, B, Si, Fe sobre aceros de bajo contenido de carbono.

El recubrimiento sobre este tipo de aceros se empleará para mejorar su funcionalidad sobre todo cuando se requiera de un endurecimiento superficial para obtener una mayor resistencia al desgaste.

Se utilizará el método de desgaste pin on disk (Espiga sobre disco) para evaluar el desgaste del recubrimiento variando parámetros de velocidad y peso.

6.2 METODO DE PRUEBA "PIN-ON-DISK"

Este método está basado en la norma G99 de la ASTM y describe el procedimiento a seguir en el laboratorio para determinar el desgaste de materiales por deslizamiento, usando una maquina o equipo pin on disk.

El método puede aplicarse a una gran variedad de materiales. El único requisito es que las probetas tengan dimensiones específicas para que puedan resistir las cargas aplicadas durante el ensayo. Los materiales a ser probados deberán tener una detallada descripción en cuanto a dimensiones, acabado superficial, tipo de material, forma, composición, microestructura, tratamientos térmicos y dureza.

6.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO PIN ON DISK.

Un equipo pin on disk consiste en un posicionador de pin (espiga), el cual es colocado perpendicularmente respecto a un disco; dicho pin de diámetro (d), permanece fijo mientras que el disco gira provocando un deslizamiento relativo en el área de contacto entre ambos elementos, formando una trayectoria circular en la superficie del disco, dicha trayectoria es provocada por la acción de un motor que proporciona la velocidad de giro (w). Como se puede ver en la fig 6.1, la probeta en forma de pin se encuentra localizada a un radio (R) del centro del disco, esta probeta se presiona sobre el disco a una carga específica (F), la cual se encuentra usualmente sujeta a un brazo con contrapesos.

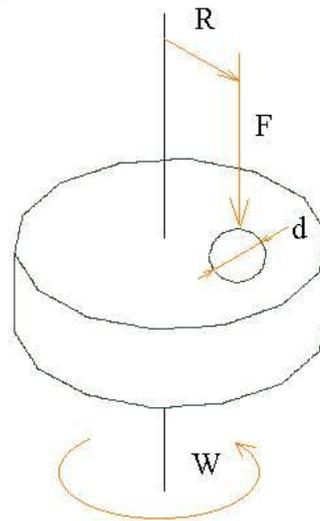


Fig.6.1 Distribución del PIN y el DISCO en un proceso de ensayo de desgaste

La probeta "pin" típica es un cilindro o una pequeña esfera, los cuales deben tener un diámetro de 2 a 10 mm. Los discos deberán tener un diámetro entre 30 y 100 mm, con un espesor que varía entre 2 y 10 mm.

El acabado superficial deberá presentar una rugosidad máxima de $0.8 \mu\text{m}$.

6.3 EQUIPO UTILIZADO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS DE DESGASTE.

Dada la importancia que tiene el equipo de desgaste pin on disk para simular condiciones prácticas, se describirá a detalle el proceso utilizado para evaluar las condiciones del desgaste sobre recubrimientos, en este caso desgaste por deslizamiento.

Para realizar las pruebas de desgaste se utilizó una máquina para estudios de tribología Cygnus II disc pins Modelo 1985, (fig. 6.2) la cual dividiremos en dos sistemas para su descripción:

- 1.-Sistema de Sujeción-Carga
 - Probeta-disco.
 - Portamuestras.
 - Brazo de carga.
- 2.- Sistema de transmisión
 - Motor.
 - Variador de velocidad.
 - Lector de velocidad.



Fig. 6.2 Tablero de control de la máquina para estudios de tribología Cignus II

6.3.1 SISTEMA DE SUJECIÓN-CARGA.

Este sistema se encuentra en la parte superior de la máquina y tiene la tarea de sujetar la probeta "pin" y, al mismo tiempo aplicar la carga dispuesta sobre el disco, para que se presente el fenómeno del desgaste, dicho mecanismo se puede ver en la figura 6.3



Fig. 6.3 Mecanismo de sujeción-carga de la máquina de desgaste.



6.3.1.1 PROBETA-DISCO

La probeta "pin" es la pieza que estará, en este caso de estudio, en constantes mediciones de pérdidas de peso es de forma cilíndrica de aproximadamente 25 mm de diámetro y que detalla en el apéndice C.

El disco es una pieza de aproximadamente 110 mm de diámetro y que en el centro consta de un agujero para la sujeción del mismo, está fabricado de un acero para fleje templado, para garantizar mayor dureza que la probeta "pin". Dichos elementos se pueden ver en fig. 6.6

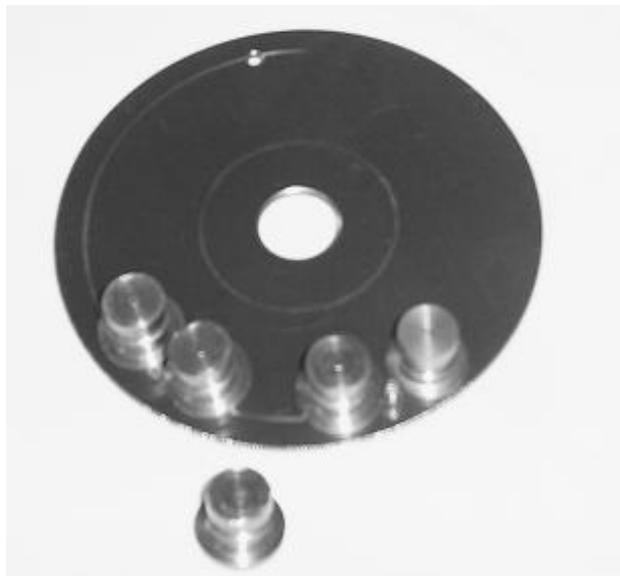


Fig. 6.4 Probetas sobre el disco de desgaste

6.3.1.2 PORTA MUESTRAS.

El dispositivo deberá tener como condición la adecuada sujeción de las probetas, para garantizar la perpendicularidad para con el disco (± 1 grado de desviación), con el propósito de mantener las condiciones de contacto necesarias.

Este elemento fue modificado del original, dado que se necesitaban probetas de mayor diámetro, para una mejor aplicación del recubrimiento en estudio, el dispositivo cuenta con tres orificios para sujetar mismo número de probetas "pin". El eje del dispositivo cuenta con las adaptaciones necesarias para asentar debidamente sobre el disco y en la parte superior para transmitir la carga dispuesta para el ensayo de desgaste.



Fig. 6.5 Porta muestras modificado

6.3.1.3 BRAZO DE CARGA.

El implemento de la carga axial se ubica en la parte superior del sistema sujeción-carga y consta de un brazo de acero; en un extremo del brazo se ubica un plato para colocar los discos con diferentes pesos, desde 100 gr. hasta 1000 gr. En el otro extremo tiene un contrapeso para hacer balance. En la parte central del brazo se encuentra una espiga formando una especie de T y en la parte inferior de esta se encuentra un asentamiento, el cual se centra en un punto con otra pieza que resulta ser el portamuestras, el centrado de estas dos piezas se realiza con la ayuda de un nivel de gota, para garantizar que la carga sea axial.

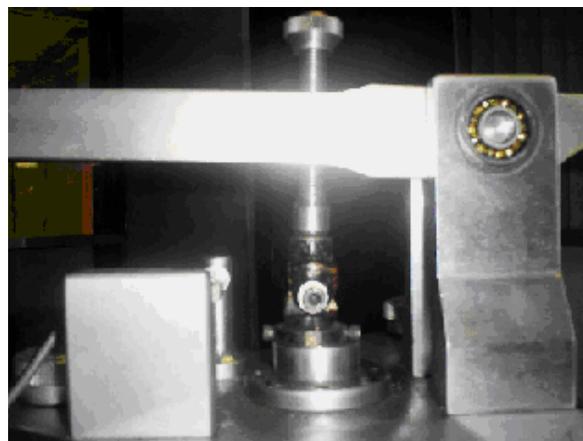


Fig. 6.6. Perspectiva de la carga axial



6.3.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN.

Este sistema se encuentra en la parte inferior de la máquina y tiene como fin transmitir el movimiento unidireccional del motor al disco para llevar a cabo el desgaste.

6.3.2.1 MOTOR.

La norma a la que están apegadas estas pruebas recomienda que la máquina debe estar equipada con un motor de velocidad variable, capaz de mantener la velocidad seleccionada constante (con una variación de $\pm 1\%$ de la máxima velocidad del motor). El motor debe estar montado de tal manera que las vibraciones no afecten las pruebas. Las velocidades de rotación más usadas se encuentran en el rango 60 a 600 rpm.

El motor que se adaptó es un motor de 1 HP, de corriente directa de 12 A. y una máxima de 2700 RPM, cubriendo las recomendaciones de la norma.



Fig. 6.7 Motor de imán permanente adaptado

6.3.2.2 CONTROL DE VELOCIDAD.

Para el control de las RPM del motor descrito anteriormente, se instaló un control o variador de velocidad con las siguientes características:

Marca: Baldor
Modelo NEMA BC160



Voltaje de entrada: 115V ò 230 V
Voltaje de salida: 90-130 VDC a 180VDC
Potencia: 1HP-115V 2HP-230V
Corriente de entrada: 12.0 A
Corriente de salida: 8.0 A

El panel tiene un interruptor para la activación del mismo y una perilla graduada en función al porcentaje de velocidad máximo para accionar el motor, como se muestra en la fig. 6.8



Fig. 6.8 Controlador de velocidad NEMA BC160



6.3.2.3 LECTOR DE VELOCIDAD.

Para la medición de las revoluciones por minuto en el motor se usó un tacómetro digital externo Fig. 6.9. Este dato es importante ya que en base a éste mismo se obtiene la distancia recorrida de la muestra cuando es sometida a desgaste.



Fig. 6.9 Foto tacómetro digital de luz infrarroja

6.3.3 BALANZA ANALÍTICA.

Siguiendo la recomendación de la norma que dice que cualquier balanza utilizada para medir la pérdida de masa en las probetas deberá tener una sensibilidad de por lo menos 0.001 gr. Y en casos de poco desgaste se necesitan mayores sensibilidades de hasta 0.0001 gr. Para el caso de estudio antes y después de cada evento o ensayo de desgaste se utilizó una balanza analítica, con la siguiente descripción:

Marca: Explorer

Equipada con panel (parabrisas) y platillo de 3.5"

Alcance máximo: 62 gr.

Resolución: 0.0001 gr.



Fig. 6.10 Balanza analítica

6.4 ENSAYO DE DESGASTE

En este proceso se llevaron a cabo los ensayos de desgaste pin-on-disk, basados en la norma G99 de la ASTM, en donde se utilizaron, probetas con el recubrimiento en estudio y probetas sin recubrir, es decir solo con el material base (AISI 1018), esto con el propósito de comparar los resultados de desgaste con y sin recubrimiento.

El procedimiento de los ensayos, fue el mismo para ambos casos es decir se trataron de dar los mismos variantes controladas (numero de repeticiones, tiempo de ensayo y RPM).

6.4.1 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.

1) Se realizó la limpieza de las probetas "pin" utilizando acetona para su limpieza colocando las piezas en un equipo de ultrasonido el cual permite que las probetas estén sin impurezas, al realizar los ensayos.

2) Se colocó el disco de desgaste en el dispositivo de sujeción de la transmisión, de tal manera que el disco se encontrara perpendicular al eje de rotación.

3) Antes de colocar las probetas "pin" en el dispositivo de sujeción, se marcaron y se pesaron en la balanza analítica para saber el peso de las probetas antes y después del ensayo y así cuantificar la pérdida de peso la cual puede medir hasta un rango de una diezmilésima de gramo, esto se efectuó para cada ensayo, tomando los datos de cada lectura.



6) Se montaron tres probetas "pin" en su dispositivo de sujeción, de tal manera que quedará perpendicular al disco con el fin de mantener las condiciones de contacto sobre el disco.

5) Se aplicó la carga primero de 150 gr. Después de 300 y 600 gr. en diferentes eventos.

6) Se prendió el motor con controlador de velocidad y se ajustó primero a 670 RPM con ayuda del tacómetro digital externo para los primeros eventos con 150. 300 y 600 gr. Después se ajustaría a 900 RPM para las mismas cargas.

7) Se inició el ensayo con las probetas en contacto sometidas a carga y RPM seleccionados tomando como referencia los datos de desgaste del trabajo realizado por Garduño y Gutiérrez²⁰ en el cual se trabajó con recubrimientos de niquelado químico sobre aceros. En base a estos trabajos se realizaron diferentes ensayos y fue posible establecer una relación de partida para este trabajo con depósitos por proyección térmica en el cual se concluyó que era necesario incrementar la carga con respecto a las referencias tomadas.

Para ello se evaluó la duración de los diez eventos por cada carga con un cronómetro externo y con dichos datos se calculó después la distancia recorrida. La prueba se detenía después de completar 3 minutos, por cada evento.

8) Se extrajeron las probetas "pin" y se limpiaron de cualquier partícula presente.

9) Se pesaron nuevamente en la balanza analítica y se anotaban los datos.

Este procedimiento se repitió desde el punto 6 al 9 en diez ocasiones por cada una de las tres cargas (150,300 y 900 gr) y a su vez por cada velocidad (670 y 900 RPM). En total, se realizaron 180 ensayos para las tres probetas "pin" con recubrimiento y también sin recubrimiento. La secuencia se puede observar en la fig. 6.11.

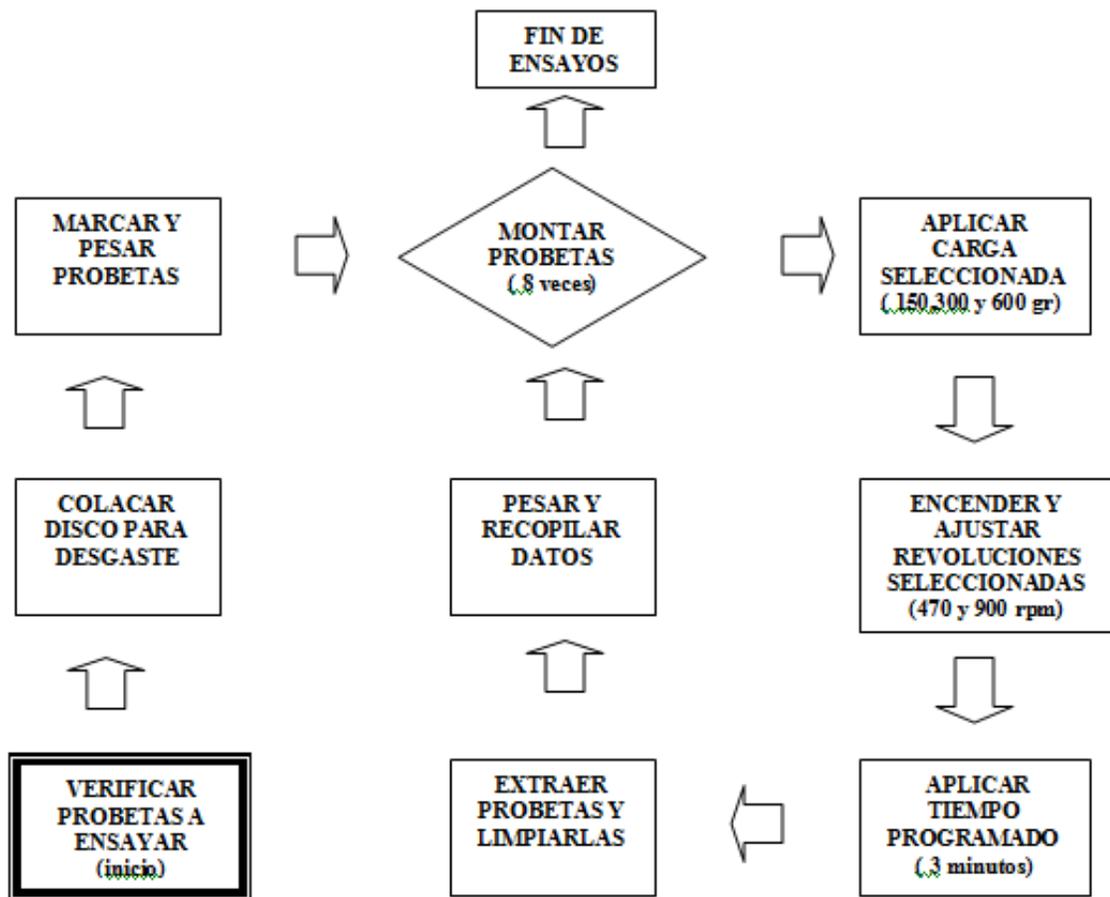


Fig. 6.11 Mapa de procedimiento, del ensayo pin-on-disk para el caso de estudio.

6.5 EVALUACIÓN DE DESGASTE EN LAS PROBETAS.

Tomando en cuenta que se tienen las siguientes variables:

Propiedades del material:

H= Dureza del material

P= Densidad del material

V= Volumen de desgaste

Condiciones de prueba:

RPM= Revoluciones x minuto a la cual gira la muestra

L= Carga axial (Kg)



t= tiempo de ensayo (min)

S_0 = Distancia de deslizamiento (m)

6.5.1 DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO.

Tomando el arreglo del porta muestras en donde se localizan los tres barrenos para montar las probetas "pin" en donde existe un diámetro de trayectoria de 6.5 cm y tomando las lecturas de las RPM junto con el tiempo de ensayo, se prosigue con los siguientes cálculos:

Si : 1 Rev = $\pi\theta$ = Perímetro

$$(1) \quad \frac{\text{rev}}{\text{min}} \frac{(\theta\pi(\text{cm}))}{\text{rev}} = \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

Entonces

$$(2) \quad S_0 [\text{cm}] = (\text{RPM})(\theta(\pi))(t)$$

Dónde:

t= tiempo de ensayo (min.)

RPM= Revoluciones x minuto a la cuales giran las muestras.

θ = Diámetro de las muestras.



6.5.2 PÉRDIDA DE PESO.

Para obtener la pérdida de peso, se utilizó una balanza analítica con una sensibilidad de hasta diezmilésimas de gramo, luego pesar las probetas antes y después de los ensayos.

$$TP = P_i - P_f [Kg]$$

(3)

Donde:

TP= Pérdida de peso

P_i= Peso inicial

P_f= Peso final

6.2.3 Razón de desgaste

Para la razón de desgaste, ésta dependerá de la pérdida de peso, respecto a la distancia recorrida, es decir se analizará la pérdida de peso de las probetas en estudio dependiendo de la distancia recorrida sobre el disco de desgaste.

$$q = \frac{TP}{S_0}$$

(6)

Donde:

TP= Pérdida de peso.

S₀= Distancia de deslizamiento.

**CAPÍTULO VII****Presentación y discusión de resultados****7.1 INTRODUCCIÓN**

En el desarrollo del trabajo se pudo establecer una metodología para mejorar no solo la deposición de recubrimientos superficiales mediante proyección térmica por flama, sino también para cualquier técnica de deposición que involucre las condiciones similares al proceso de deposición mediante proyección térmica.

La figura 7.1 muestra el procedimiento de la metodología propuesta para generar la deposición del recubrimiento superficial mediante el proceso de proyección térmica.

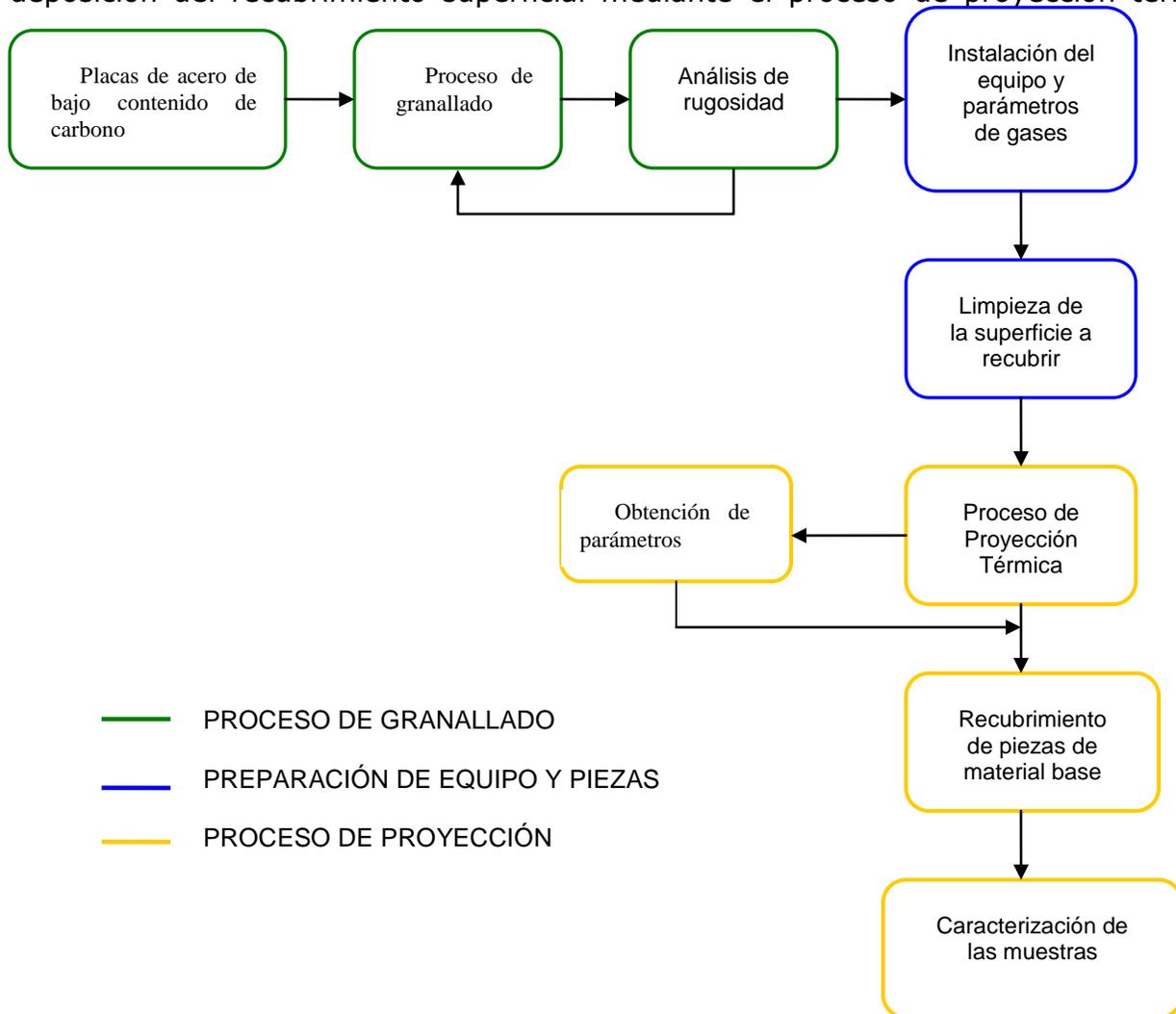


Figura 7.1 Procedimiento utilizado para la deposición por proyección térmica.

7.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

1) OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA GRANALLAR

El primer paso es cortar probetas a una longitud deseada, teniendo ya las probetas se realiza un desbaste a cada una de sus aristas (chaflán) para eliminar los filos y evitar un desprendimiento del recubrimiento en esas zonas como se muestra en la figura 7.2., posteriormente eliminan las impurezas de la superficie como son: óxidos, grasas, partículas como rebabas o polvos etc.



Figura 7.2 Probeta de acero cortada, con chaflán.

2) OBTENCIÓN DE RUGOSIDAD

El siguiente paso es obtener un valor de rugosidad óptima, el cual se describe a continuación:

Parámetros:

Presión de aire del compresor.

Distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato.

Tiempo de granallado.

Procedimiento para determinar la rugosidad óptima de la superficie de las probetas:

Tipo de granalla utilizado: Granalla de acuerdo al tipo de material a trabajar como: óxido de aluminio, carburo de silicio etc.

Tomando valores constantes para el granallado de las probetas: Presión de aire del compresor, distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato.

- 1) Granallar probetas, ver figura 7.3, en las cuales, la variable a manejar es el tiempo, tomar intervalos de 0.5 [min], de 0 a 5 [min], y posteriormente ampliar el intervalo a 2 y 3 [min].



Figura 7.3 Proceso de granallado

- 2) Evaluar por medio de un rugosímetro. En este caso se muestra un rugosímetro digital (Mitutoyo SurfTest-402), Figura 7.4, el valor de rugosidad obtenido con cada variación de tiempo.



Figura 7.4 Rugosímetro digital.

- 3) Se grafican y analizan los resultados obtenidos.
- 4) Obtener los parámetros óptimos para el granallado.

3) OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA PROYECCIÓN TÉRMICA

Teniendo los parámetros se procede a granallar las piezas como se muestra en la figura 7.5.



Figura 7.5 Probeta granallada.

4) LIMPIEZA

Previo al proceso de proyección térmica se debe limpiar cada pieza con sustancias limpiadoras como acetona, tricloroetileno u alcohol, tal como se muestra en la figura 7.6, y una pequeña brocha, para evitar que tenga impurezas como grasa, polvo u otras partículas.



Figura 7.6 Alcohol Metílico Anhídrido.

5) PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA

Selección del proceso y equipo de proyección térmica y material a depositar para selección de parámetros.

➤ Armado del equipo

El primer paso es el correcto armado o instalación del equipo.

Los parámetros a considerar antes de iniciar el proceso de proyección térmica son:

➤ Presión de aire:

La presión de aire a la salida del compresor debe ser seleccionada en base al proceso a utilizar en el caso de proyección por flama 2 (Bar), este parámetro es proporcionado por el proveedor del equipo, además de que el flujo de aire debe ser abundante, por lo que se deben evitar reducciones en la conexión pistola-compresor.

➤ Lectura del flujómetro de gases

Para comenzar el proceso se debe considerar la lectura de los manómetros en los cilindros (presiones de trabajo) y en el flujómetro de los gases, oxígeno y acetileno,

los cuales se manejan en base al material utilizado y los valores descritos en el anexo, proporcionado por el proveedor.

➤ Distancia entre la boquilla y la superficie de la probeta

Para la obtención de una distancia óptima en el proceso se realiza la prueba llamada Patrón de huella o patrón de rociado, la cual consiste básicamente en los siguientes pasos:

- 1) Con los parámetros obtenidos anteriormente para el proceso de granallado y de lectura de gases, el primer paso es realizar el proceso de proyección térmica sobre un punto fijo de la probeta, ver figura 7.7, con un tiempo común definido de 1 [min] haciendo únicamente variaciones de la distancia entre la boquilla de la pistola y la superficie de cada probeta, esto es, dirigiendo el flujo de material proyectado a un solo punto de cada probeta sin realizar ningún movimiento durante este proceso y variando la distancia de la boquilla de la pistola y la superficie en las siguientes probetas para obtener un patrón de huellas de proyección a diferentes distancias.

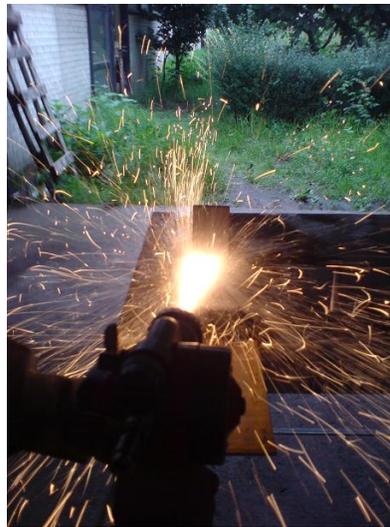


Figura 7.7 Proceso de proyección térmica en un solo punto.

- 2) Una vez obtenido este patrón de huellas de proyección a diferentes distancias se procede a extraer una pequeña parte de la huella de cada probeta por medio de una cortadora abrasiva y se prepara realizando el proceso de metalografía.
- 3) Estas partes pueden ser evaluadas por medio de microscopía electrónica. Para determinar las características obtenidas en cada evento en este trabajo se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca Philips serie XL20

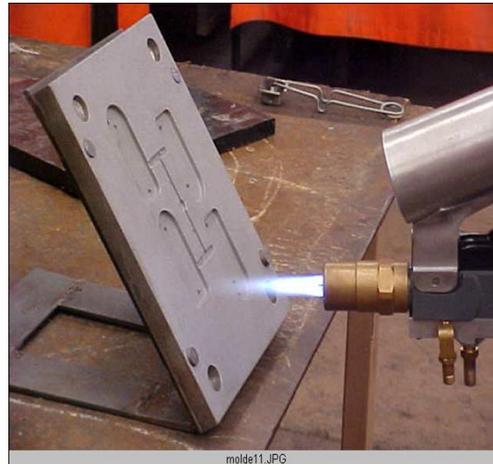


Figura 7.9 Proceso de proyección térmica por flama con uso de soporte de sujeción.

La temperatura de cada una de las probetas, al momento de ser recubiertas, es controlada por medio de intervalos (constantes de 1 [min]) de proyección para evitar su sobrecalentamiento, y por medio de su permanencia al aire libre para disminuir su temperatura y tener el control del intervalo de temperatura recomendado por el proveedor (de 90 a 120 [°C]).

La última etapa de la metodología consiste en realizar pruebas de microscopía electrónica y microdureza Vickers en un área de sección transversal perpendicular a la cara recubierta, tomando una pequeña muestra de cada una de las probetas para estudios metalográficos o de otra índole en base a la caracterización de la muestra. Se realiza el corte por medio de una máquina cortadora abrasiva, para este trabajo se utilizó una cortadora marca BUEHLER Abrasimet, figura 7.10, y un disco para corte metalográfico marca BUEHLER 10-4212, Hard Steel.



Figura 7.10 Cortadora abrasiva marca Buehler



7.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO

En esta parte se mostrarán las pruebas realizadas para caracterizar la rugosidad de las muestras.

1) PROCESO DE GRANALLADO

- Parámetro de distancia en el proceso de granallado.

La tabla 7.1 muestra los datos obtenidos en las pruebas de variación de tiempo de granallado contra rugosidad, con los cuales se obtuvo su curva característica, figura 7.11, para determinar el parámetro de tiempo de granallado.

Número de Probeta	Tiempo [min]	Rugosidad [μm]
1	0.5	6.6
2	1	7
3	1.5	7
4	2	7.5
5	2.5	10.2
6	3	7.6
7	3.5	7.7
7	4	9
9	4.5	7.9
10	5	7.7
11	7	7
12	10	7.2

Tabla 7.1 Valores característicos de tiempo de granallado contra rugosidad.



Figura7.11 Curva característica de granallado, rugosidad contra tiempo.

Por medio de la geometría de la superficie a trabajar y del tiempo invertido en el proceso, la velocidad de la pistola de granallado respecto a la superficie de la probeta es 50.7 [cm/min]. Para el rango de valores utilizado, se puede notar que la rugosidad mínima obtenida es de 6.6 [μm], la máxima de 10.2 [μm] y el promedio de 7.37 [μm].

Para estas condiciones las probetas de acero presentaron una adecuada rugosidad para un tiempo de 2 minutos; para tiempos mayores a este el comportamiento lo que permite seleccionar el tiempo de granallado de 2 [min].

Con estas condiciones se pueden indicar los parámetros para el proceso de granallado:

Presión de aire a la salida del compresor: 7 [Bar]

Distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del substrato: 1 [in] (2.54 cm).

Tiempo de granallado: 2 [min]

2) CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS.

El análisis químico realizado mediante la microsonda en el microscopio electrónico ver figura 7.12, muestra los componentes del polvo utilizado después de ser proyectado en una zona del material base.

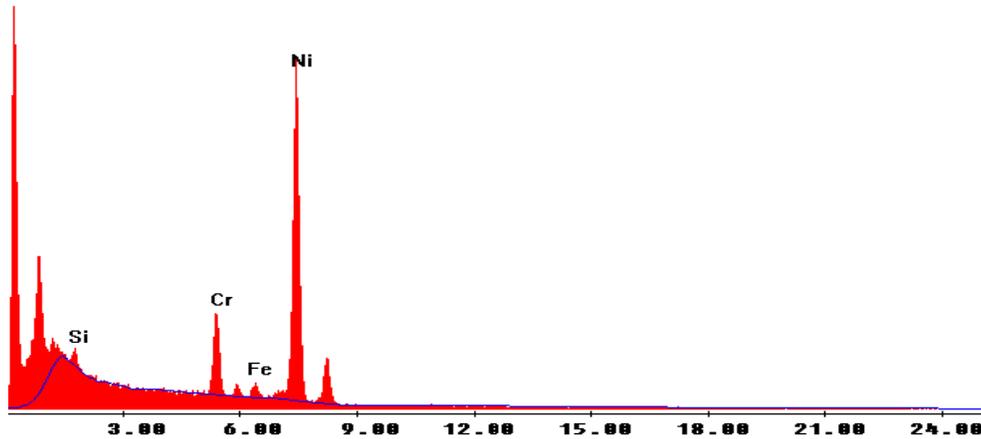


Figura 7.12 Resultado del análisis químico sobre una zona del recubrimiento.

- La observación de las probetas revestidas mediante microscopía electrónica, permitió observar que la unión del recubrimiento y material base es aceptable debido a que el proceso automatizado permitió una considerable disminución de porosidades y de inclusiones de óxido, una muy buena homogeneidad en cuanto a las capas, tanto internas como en la superficie del recubrimiento y de partículas fundidas de material de alimentación, ver figura 7.13

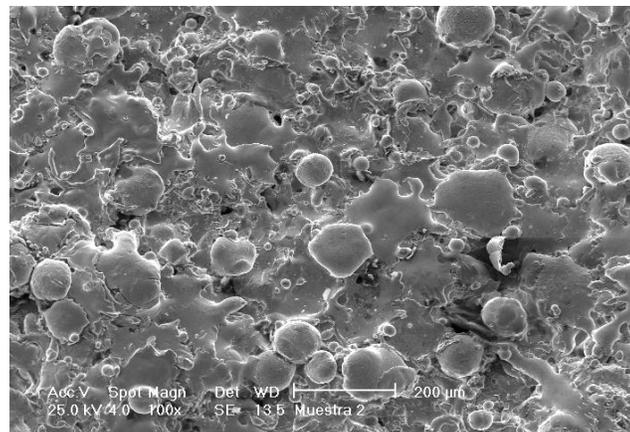


Figura 7.13 Splat formado en una superficie aceptable.

Las pruebas inicialmente realizadas dieron lugar a modificaciones al diseño inicial para corregir algunas insuficiencias. Dentro de las consideraciones más importantes que se deben de tomar en cuenta para la automatización del



proceso de proyección térmica se pueden resumir en la calibración de las piezas acopladas a la pistola (calibración de switches de la chispa y del motor, distancias del actuador del gatillo hacia el gatillo, cambio de la entrada para el brazo accionador de la válvula de gas para un nuevo motor, nueva colocación de la chispa de encendido, entre otras), la modificación en el diseño del circuito de control (torque no suficiente para la válvula de apertura y cierre de gas creando con ello un nuevo circuito para el control de un nuevo motor, mala colocación de cableado, trabado de funciones) y el nuevo diseño de piezas de acoplamiento (modificación del soporte para el nuevo motor, nuevo diseño para el actuador del gatillo). Estos aspectos y calibraciones fueron realizadas inmediatamente y sin problemas y con ello se logró dar pauta al buen funcionamiento de todo el proceso de automatizado.

La caracterización de los recubrimientos en este trabajo permitió hacer un estudio comparativo de datos obtenidos mediante otros procesos por parte de empresas de nivel mundial. En este caso se comparó con Sulzer Metco.

Al hacer un análisis comparativo y cualitativo se validó que realmente había una similitud en calidades en cuanto a la uniformidad de recubrimiento pero lo concerniente a la regularidad del espesor se pudo mejorar en gran medida comparado con los datos experimentales que recomienda en sus tablas técnicas de deposición. Estos lo superan por un margen de 1 milímetro superior al mencionado por Sulzer Metco, considerando uniforme la deposición y también se lograron mayores espesores pero el recubrimiento iba perdiendo uniformidad.

Para la obtención de los distintos recubrimientos de forma automatizada se crearon programas de control por medio del MOTOMAN con una mejor estructuración dando con ello una mayor precisión. Estos resultados finales se compararon con placas con recubrimiento creadas en un principio, llegando a la conclusión de que los recubrimientos iniciales tenían algunas imperfecciones como niveles de proyección más alto en algunos lugares que en otros, es decir, una proyección no pareja y por consiguiente de mala calidad. Éstos últimos recubrimientos presentaron texturas casi perfectas con una proyección pareja y una mayor adherencia, es decir, el material quedó muy bien adherido a las piezas de trabajo, cumpliendo con ello los objetivos planteados desde un principio.

Gracias a este tipo de sistemas de automatización es posible rehabilitar productos que algunas veces son de mala calidad o simplemente se gastan debido al uso. Y se puede rehabilitar toda una gama de piezas críticas que son importantes y que no pueden conseguirse tan fácilmente.



El rediseño del soporte del motor se dio debido a que en un principio se había contemplado un motor a pasos del tipo que se utiliza en la industria de las impresoras, lamentablemente éste no otorgó el torque deseado para la activación de la válvula de apertura y cierre del gas combustible, lo que ocasionó que se tuviera que reemplazar a dicho motor por otro de tipo reductor de menor dimensión pero de mayor torque, este último es más sencillo en su funcionamiento eléctrico pero el arreglo que tiene de engranes lo hace muy potente y capaz de mover piezas pesadas o rígidas según sea el caso con mucha facilidad.

En el actuador se tuvo que modificar el gancho que accionaba al gatillo ya que en un principio se tenía una especie de garfio que sostenía al gatillo para su actuación, esto no dio resultado ya que la altura diseñada no fue la correcta y el gatillo presentó variaciones a la hora de ejecutar su accionamiento. Por tal motivo se tuvo que retirar esa terminación y colocar un barreno al cual se le introdujo un tornillo con una laminilla que es graduada con una contratuerca, lo cual da la libre elección de la altura deseada para la efectiva adecuación del gatillo y así poder lograr una mejor proyección de material debido a una buena apertura del gatillo durante el proceso.

En la parte del control se realizaron pocas modificaciones, básicamente fueron puros ajustes en los switches y cambios en mal cableado para la detención del brazo de accionamiento de la válvula del gas, lo cual mostró que fue un diseño bien planeado. En cuanto a la chispa se modificó su estancia original ya que el sistema que se había planteado en un principio se vio afectado por la temperatura que se maneja en la punta de la pistola y se tuvo que retirar de esa posición y colocarlo en la mesa de trabajo para que, en conjunto con el recorrido del programa, se accionara y se obtuviera la chispa de encendido adecuada. Esta última decisión fue acertada ya que con ello se logró un eficaz trabajo y el encendido fué perfecto.

En cuanto al brazo mecánico se plantearon desde un principio varias reglas que no podían ser modificadas dentro de las cuales existía una de suma importancia que era la de no exceder el peso en el diseño debido a que la extensión total del brazo podría tener una oscilación y llegar a la falla del equipo lo que conllevaría a muchos accidentes. Se logró el cometido y el equipo ya cargado en su totalidad con polvo de proyección no rebasó el punto crítico de peso que nos indica el brazo mecánico el cual era de 7 kg. Una vez extendido totalmente.



La automatización conseguida trajo como consecuencia la mejora de las propiedades de los recubrimientos tales como: reducción de porosidad; lo que entrega un alto índice de mejora en la resistencia a la corrosión, un mejor acabado superficial; lo que quiere decir que ya no será necesario que la pieza sometida al proceso tenga que pasar a un segundo proceso de refinamiento en su superficie en alguna máquina rectificadora lo que conlleva a una economía en el proceso.

Se realizaron varias proyecciones con el equipo automatizado, lo que también permitió un acabado más uniforme de una calidad mucho mayor que la de la mano humana, en un tiempo más corto. En un principio al realizar la proyección de forma manual se pudo ver que se entregaba una fijación de material bastante defectuosa con demasiadas aglomeraciones en ciertas zonas y en otra falta de material. Una vez que se automatizó el proceso se encontró que se puede obtener un espesor en toda la superficie de la probeta de 0.5 mm. sin falta de material y con un acabado más uniforme y de mejor calidad, lo que evidencia que se logró el cometido que era el de agilizar el proceso y la obtención de productos con mayor calidad. Esto permitió también demostrar que se pueden lograr revestimientos de mayor precisión en piezas que así lo requieran y darle un espesor uniforme y de mayor exactitud. Esto en la industria refleja que se puede tener un amplio espectro de vida de una pieza ya que se le pueden hacer desde modificaciones en la dureza o cierta característica de la superficie como el de reacondicionarla para darle un mayor tiempo de vida útil y así disminuir los costos de mantenimiento en cuanto a reemplazo de piezas.

A continuación se presentan resultados detallados de pérdida de peso y razón de desgaste contra distancia recorrida, para ambos materiales, con recubrimiento Aleación AE (Ni, Cr, B, Si, Fe), así como del material base sin recubrir AISI 1018, después se hacen comparaciones de los mismos.

De acuerdo a los ensayos realizados, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

7.4 ENSAYOS DE DESGASTE

Cabe destacar que el rango de las gráficas de cada material es el mismo para todas las gráficas, esto con el fin de hacer notar la diferencia en la pérdida de peso de las probetas en sus diferentes condiciones de prueba. Los resultados en cada gráfica corresponden a, tres probetas con las mismas condiciones de obtención del recubrimiento, y semejantes condiciones en los ensayos de desgaste.



Probetas sin recubrir AISI 1018 (Tp)

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0009	0.0023	0.0008
57585.4	0.0018	0.0046	0.0015
86378.1	0.0018	0.0058	0.0020
115170.8	0.0018	0.0070	0.0025
143963.5	0.0023	0.0084	0.0041
172756.2	0.0028	0.0098	0.0058
201548.9	0.0034	0.0112	0.0075
230341.6	0.0040	0.0126	0.0091

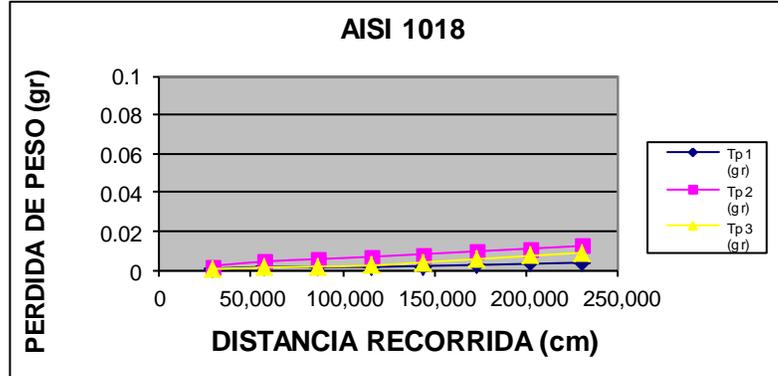


Tabla 7.1 Valores de pérdida de peso contra distancia recorrida en ensayos de desgaste pin on disk

Gráfica 7.1 Pérdida de peso de tres probetas de 1018 sin recubrimiento. Ensayo pin on disk.

En la gráfica 7.1, la máxima de pérdida de peso, es de un rango de 0.0040 a 0.0126 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Su comportamiento es lineal., es decir a mayor distancia mayor pérdida de peso. La pérdida de peso, en términos generales es baja lo cual está asociado a la baja carga empleada, lo cual permite al acero comportarse adecuadamente bajo estas condiciones.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0060	0.0128	0.0051
57585.4	0.0120	0.0255	0.0102
86378.1	0.0137	0.0342	0.0119
115170.8	0.0155	0.0429	0.0135
143963.5	0.0190	0.0512	0.0172
172756.2	0.0224	0.0595	0.0209
201548.9	0.0258	0.0702	0.0234
230341.6	0.0292	0.0808	0.0258

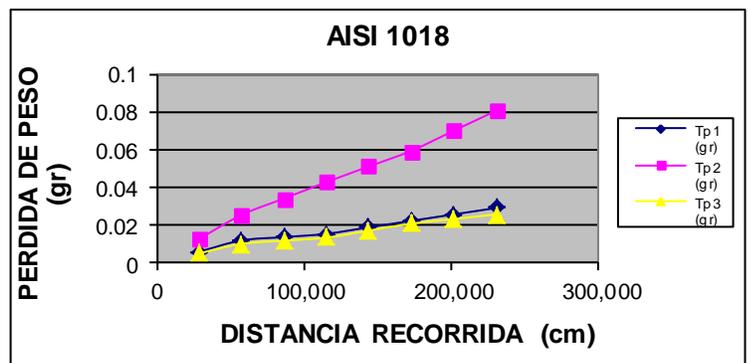


Tabla 7.2

Gráfica 7.2



En la gráfica 7.2, la tendencia de pérdida de peso es semejante y el valor máximo presenta un rango de 0.0258 a 0.0808 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Con el incremento de carga se percibe un aumento de la cantidad de material de pérdida, la que ya es más significativa.

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0035	0.0060	0.0023
57585.4	0.0069	0.0119	0.0047
86378.1	0.0137	0.0255	0.0108
115170.8	0.0206	0.0390	0.0169
143963.5	0.0256	0.0533	0.0236
172756.2	0.0307	0.0676	0.0303
201548.9	0.0390	0.0812	0.0356
230341.6	0.0474	0.0948	0.0408

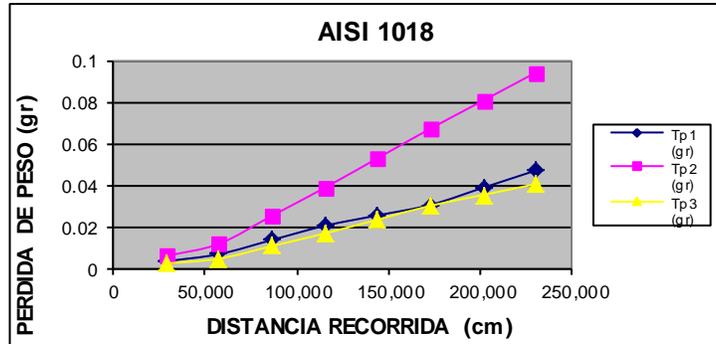


Tabla 7.3

Gráfica 7.3

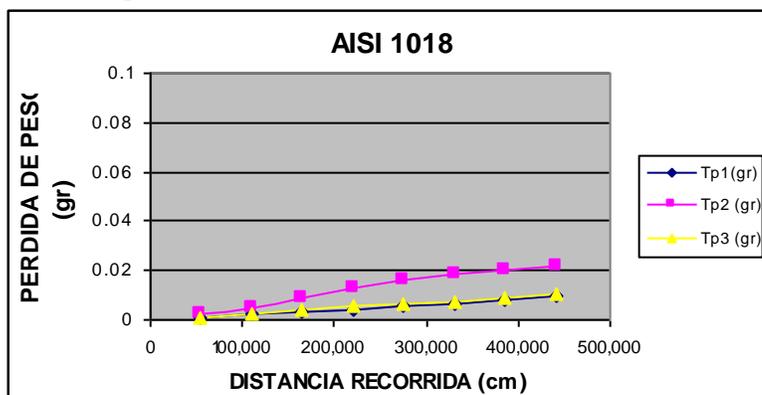
En la gráfica 7.3 se destaca tendencia similar de pérdida de peso de las tres probetas, en donde el valor máximo en pérdida de peso está en rango de 0.0408 a 0.0948 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Se observa que con estas condiciones, se tiene 7 veces más pérdida de peso que con las condiciones de la gráfica 7.1. Esto se debe principalmente al incremento de peso que es el doble y a la misma condición de RPM y representaría un comportamiento típico del acero de bajo carbono estudiado.



A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0012	0.0025	0.0010
110269.9	0.0024	0.0050	0.0021
165404.9	0.0030	0.0090	0.0038
220539.8	0.0037	0.0130	0.0054
275674.8	0.0053	0.0158	0.0064
330809.7	0.0068	0.0185	0.0074
385944.7	0.0083	0.0203	0.0090
441079.6	0.0099	0.0220	0.0105

Tabla 7.4



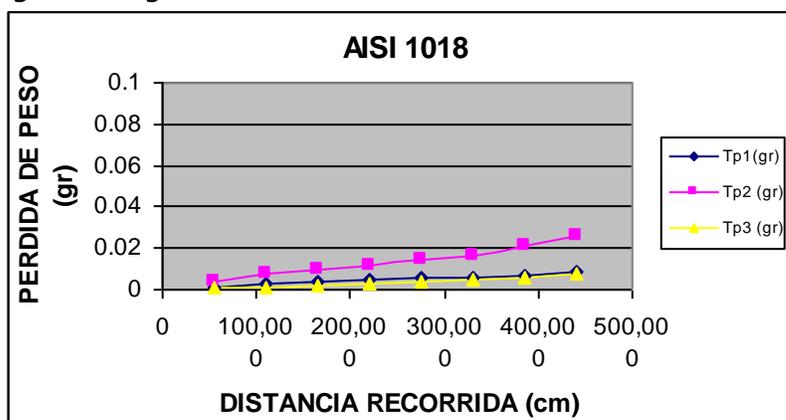
Gráfica 7.4

En la gráfica 7.4 las distancias recorridas se incrementan casi al doble comparadas con las tres anteriores, se puede observar que a la distancia de 220,539 (cm) la máxima de pérdida de peso, está en un rango de 0.0037 a 0.0130 (gr), si los comparamos con los rangos máximos de la gráfica y tabla 7.1, se observa que con menor distancia 9.802 (cm) recorrida se rebasa el máximo de pérdida de masa de aquellas condiciones. También es importante recalcar el efecto que tiene al incrementar la velocidad ya que con ello se produce un intervalo mayor de contacto entre las probetas y el disco, lo que contribuye a acentuar el proceso de desgaste adhesivo.

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0012	0.0039	0.0006
110269.9	0.0025	0.0079	0.0012
165404.9	0.0037	0.0099	0.0021
220539.8	0.0049	0.0119	0.0030
275674.8	0.0053	0.0142	0.0037
330809.7	0.0058	0.0164	0.0044
385944.7	0.0070	0.0212	0.0060
441079.6	0.0082	0.0259	0.0076

Tabla 7.5



Gráfica 7.5

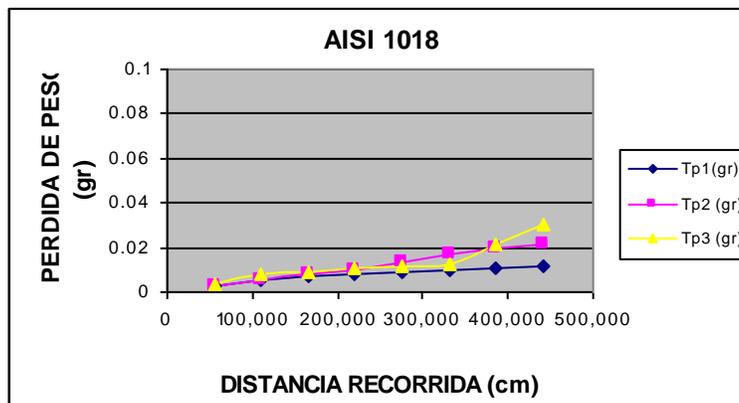
En la gráfica 7.5, se puede observar que la máxima pérdida de peso, es de 0.0076 a 0.0259 (gr) a los 441,079 (cm) de distancia recorrida, mostrándose una tendencia similar a la que se presenta en la gráfica 7.4: Bajo estas condiciones de prueba parece influir poco el aumento de carga.



A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0027	0.0027	0.0038
110269.9	0.0055	0.0055	0.0076
165404.9	0.0070	0.0078	0.0089
220539.8	0.0084	0.0101	0.0103
275674.8	0.0090	0.0135	0.0112
330809.7	0.0096	0.0169	0.0122
385944.7	0.0108	0.0192	0.0211
441079.6	0.0120	0.0215	0.0300

Tabla 7.6



Gráfica 7.6

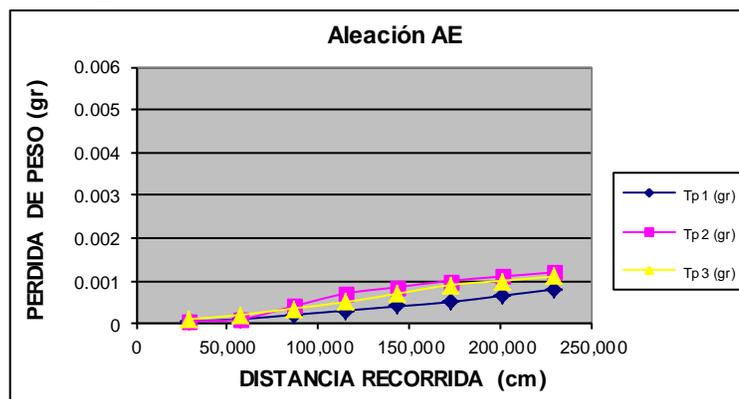
En la gráfica 7.6 se observa la tendencia de las tres probetas. El rango máximo es de 0.0120 a 0.03 (gr) en los 441,079 (cm) recorridos. Se muestra un pequeño incremento de pérdida de peso que las anteriores esto por el incremento de carga, pero la tendencia es semejante a las anteriores.

Probetas recubiertas Aleación AE

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0000	0.0000	0.0001
57585.4	0.0001	0.0001	0.0002
86378.1	0.0002	0.0004	0.0003
115170.8	0.0003	0.0007	0.0005
143963.5	0.0004	0.0009	0.0007
172756.2	0.0005	0.0010	0.0009
201548.9	0.0007	0.0011	0.0010
230341.6	0.0008	0.0012	0.0011

Tabla 7.7



Gráfica 7.7

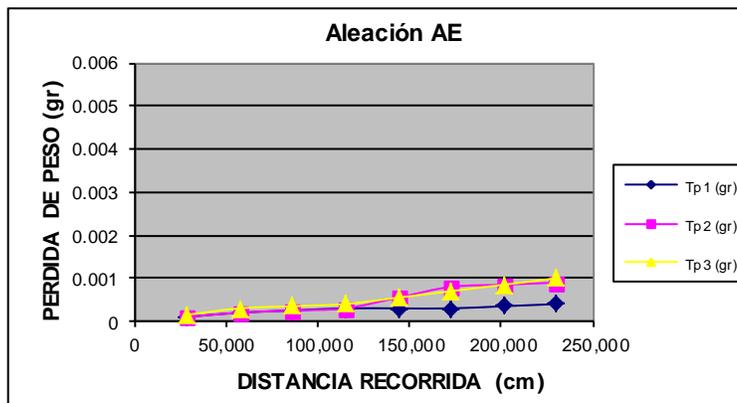
En la gráfica 7.7 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas en donde la máxima pérdida de peso, es de 0.0008 a 0.0012 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Con estos resultados se observa la importancia del recubrimiento ya que en la pérdida de peso en la prueba de desgaste es muy inferior en estos casos comparando este resultado con las pruebas de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento y a las mismas condiciones de prueba.



A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0001	0.0001	0.0001
57585.4	0.0002	0.0002	0.0003
86378.1	0.0002	0.0002	0.0003
115170.8	0.0003	0.0003	0.0004
143963.5	0.0003	0.0005	0.0006
172756.2	0.0003	0.0008	0.0007
201548.9	0.0003	0.0008	0.0008
230341.6	0.0004	0.0009	0.0010

Tabla 7.8



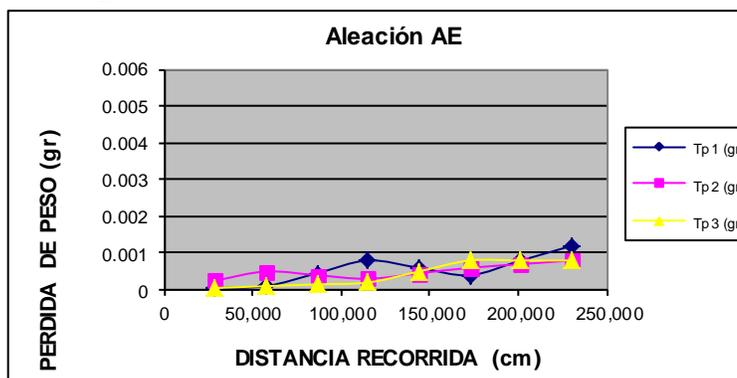
Gráfica 7.8

En la gráfica 7.8 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas y se incrementa en las probetas 2 y 3 a partir de 143,963 (cm), en donde el rango máximo de pérdida de peso, es de 0.0004 a 0.0010 (gr) a los 230,341 (cm) recorrido. Con estos resultados se observa nuevamente el aporte positivo del recubrimiento, ya que la pérdida de peso en desgaste es muy inferior en estos casos comparando este resultado con las pruebas de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento y a las mismas condiciones de prueba.

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0000	0.0003	0.0001
57585.4	0.0001	0.0005	0.0001
86378.1	0.0004	0.0004	0.0002
115170.8	0.0008	0.0003	0.0002
143963.5	0.0006	0.0005	0.0005
172756.2	0.0004	0.0006	0.0008
201548.9	0.0008	0.0007	0.0008
230341.6	0.0012	0.0008	0.0008

Tabla 7.9



Gráfica 7.9

En la gráfica 7.9 se observa que el comportamiento ya no es lineal de principio a fin y se tiene pérdidas de peso y también se puede ver aumento de peso en un rango esto se debe a que como el material desgastado se va quedando en el disco y este a su vez con una carga mayor tiende a adicionarse en la probeta. Para este caso el rango máximo de pérdida de peso es de 0.0008 a 0.0012 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Las pérdidas de peso máximas son iguales a las condiciones de la tabla 7.7 es decir con 150 gr. De igual forma podemos apreciar que comparada la probeta con recubrimiento es menor la pérdida de peso comparada con la no recubierta para las mismas condiciones de prueba.



A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0002	0.0003	0.0004
110269.9	0.0004	0.0005	0.0008
165404.9	0.0008	0.0006	0.0009
<u>220539.8</u>	<u>0.0011</u>	<u>0.0007</u>	<u>0.0010</u>
275674.8	0.0013	0.0015	0.0014
330809.7	0.0016	0.0023	0.0018
385944.7	0.0015	0.0024	0.0020
441079.6	0.0015	0.0025	0.0022

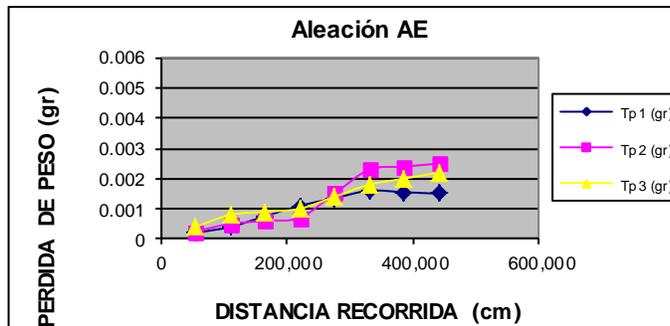


Tabla 7.10

Gráfica 7.10

En la gráfica 7.10 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas en donde se presenta el valor máximo de pérdida de peso, a los 220,539 (cm) recorridos, es de 0.0007 a 0.0011 (gr) y al doble de distancia recorrida de 0.0015 a 0.0025 (gr). Comparada con las mismas condiciones para las piezas no revestidas la pérdida de masa es aproximadamente de un orden de magnitud menor

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0012	0.0005	0.0006
110269.9	0.0025	0.0010	0.0012
165404.9	0.0036	0.0009	0.0008
<u>220539.8</u>	<u>0.0046</u>	<u>0.0009</u>	<u>0.0004</u>
275674.8	0.0048	0.0010	0.0006
330809.7	0.0050	0.0011	0.0007
385944.7	0.0053	0.0012	0.0009
441079.6	0.0057	0.0013	0.0012

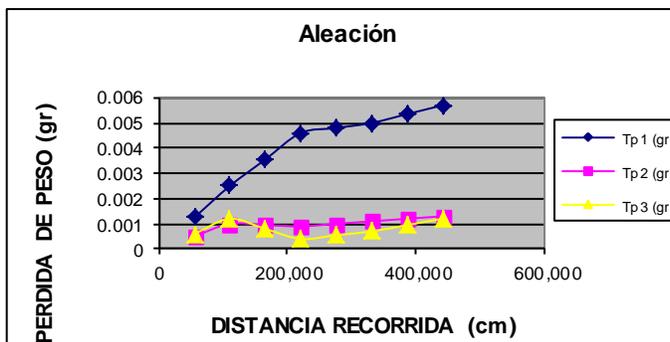


Tabla 7.11

Gráfica 7.11

En la gráfica 7.11 se observa que la probeta 1 destaca en la pérdida de peso mientras que las otras tienen un comportamiento opuesto debido a irregularidades en el recubrimiento esto es porque en algunas zonas se tenían irregularidad en el recubrimiento lo que provocó un incremento aunque mínimo de peso de esta forma se tiene que a los 220,539 (cm) recorridos, la pérdida de peso se manifiesta de 0.0004 a 0.0046 (gr) y a el doble de distancia recorrida (441,079 (cm)) es de 0.0012 a 0.0057 (cm). Estos datos son máximos, en todas las condiciones de experimentación.



A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0002	0.0000	0.0000
110269.9	0.0004	0.0000	0.0000
165404.9	0.0004	0.0002	0.0001
220539.8	0.0005	0.0004	0.0003
275674.8	0.0010	0.0005	0.0004
330809.7	0.0016	0.0006	0.0005
385944.7	0.0021	0.0007	0.0006
441079.6	0.0026	0.0007	0.0006

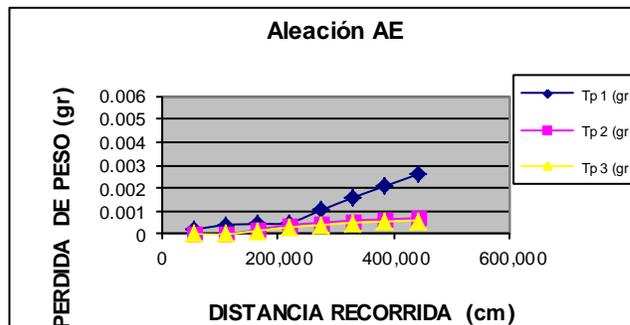


Tabla 7.12

Gráfica 7.12

En la gráfica 7.12 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas en donde el valor máximo de pérdida de peso, a los 220,539 (cm) recorridos, es de 0.0003 a 0.0005 (gr) y al doble de distancia recorrida es de 0.0006 a 0.0026 (gr). Esto debido al incremento de carga, también podemos ver y comparar que a las mismas condiciones de prueba, las probetas con recubrimiento ofrecen mejores rendimientos contra el desgaste comparado con las probetas sin recubrimiento.

Razón de desgaste.

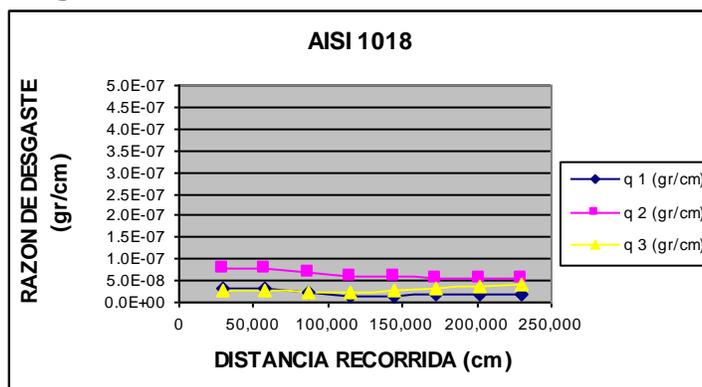
El rango de las gráficas de cada material es el mismo para todas las gráficas para hacer notar la diferencia en la razón de desgaste de las probetas con las diferentes condiciones a las que fueron sometidas a los ensayos.

Probetas sin recubrir AISI 1018 (q).

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	q1 (gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	3.1E-08	8.0E-08	2.6E-08
57585.4	3.1E-08	8.0E-08	2.6E-08
86378.1	2.1E-08	6.7E-08	2.3E-08
115170.8	1.6E-08	6.1E-08	2.2E-08
143963.5	1.6E-08	5.8E-08	2.9E-08
172756.2	1.6E-08	5.7E-08	3.4E-08
201548.9	1.7E-08	5.6E-08	3.7E-08
230341.6	1.7E-08	5.5E-08	4.0E-08

Tabla 7.13



Gráfica 7.13

En la gráfica 7.13 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde el valor máximo, es de 2.6E-08 a 8.0E-08 (gr) a los 28792 (cm)

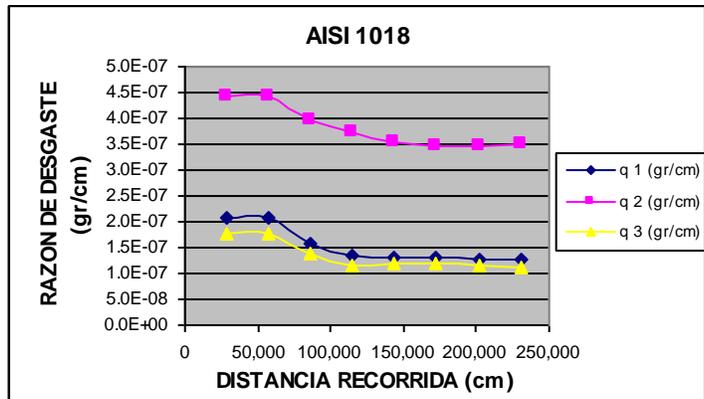


recorridos y desciende conforme avanza la distancia recorrida. El comportamiento es similar en las diferentes probetas.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	2.1E-07	4.4E-07	1.8E-07
57585.4	2.1E-07	4.4E-07	1.8E-07
86378.1	1.6E-07	4.0E-07	1.4E-07
115170.8	1.3E-07	3.7E-07	1.2E-07
143963.5	1.3E-07	3.6E-07	1.2E-07
172756.2	1.3E-07	3.4E-07	1.2E-07
201548.9	1.3E-07	3.5E-07	1.2E-07
230341.6	1.3E-07	3.5E-07	1.1E-07

Tabla 7.14



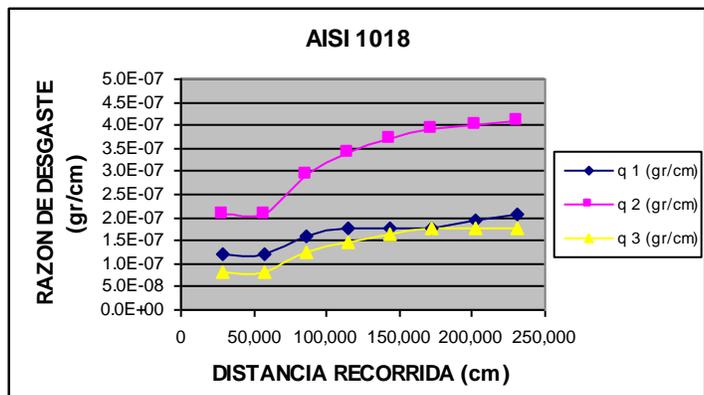
Gráfica 7.14

En la gráfica 7.14 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde el valor máximo, es de 1.8E-07 a 4.4E-07 (gr) a los 28792 (cm) recorridos y desciende conforme avanza la distancia recorrida. Se aprecia que la probeta q2 tiene valores superiores a las otras dos.

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	1.2E-07	2.1E-07	8.2E-08
57585.4	1.2E-07	2.1E-07	8.2E-08
86378.1	1.6E-07	2.9E-07	1.3E-07
115170.8	1.8E-07	3.4E-07	1.5E-07
143963.5	1.8E-07	3.7E-07	1.6E-07
172756.2	1.8E-07	3.9E-07	1.8E-07
201548.9	1.9E-07	4.0E-07	1.8E-07
230341.6	2.1E-07	4.1E-07	1.8E-07

Tabla 7.15



Gráfica 7.15

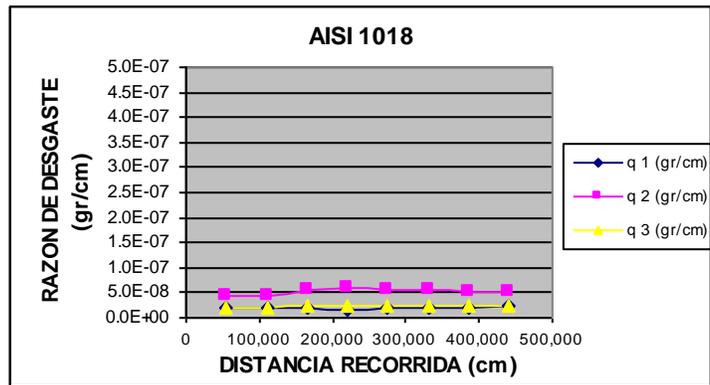
En la gráfica 7.15 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde el valor máximo, es de 1.8E-07 a 4.1E-07 (gr) a los 230341 (cm) recorridos.



A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	2.2E-08	4.5E-08	1.9E-08
110269.9	2.2E-08	4.5E-08	1.9E-08
165404.9	1.8E-08	5.4E-08	2.3E-08
220539.8	1.7E-08	5.9E-08	2.4E-08
275674.8	1.9E-08	5.7E-08	2.3E-08
330809.7	2.1E-08	5.6E-08	2.2E-08
385944.7	2.2E-08	5.2E-08	2.3E-08
441079.6	2.2E-08	5.0E-08	2.4E-08

Tabla 7.16



Gráfica

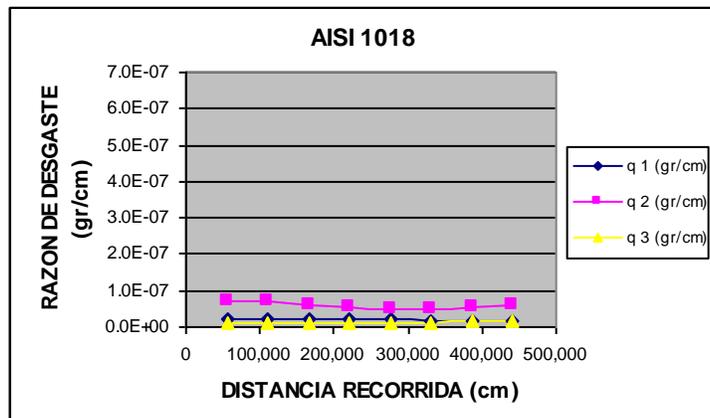
7.16

En la gráfica 7.16 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde el valor máximo, es de 1.7E-08 a 5.9E-08 (gr) a los 220539 (cm) recorridos. Se aprecia que el comportamiento es similar en las probetas con valores mayores de la probeta q2 debido al acabado superficial de esta.

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
55135.0	2.3E-08	7.2E-08	1.1E-08
110269.9	2.3E-08	7.2E-08	1.1E-08
165404.9	2.2E-08	6.0E-08	1.3E-08
220539.8	2.2E-08	5.4E-08	1.4E-08
275674.8	1.9E-08	5.1E-08	1.3E-08
330809.7	1.8E-08	5.0E-08	1.3E-08
385944.7	1.8E-08	5.5E-08	1.6E-08
441079.6	1.9E-08	5.9E-08	1.7E-08

Tabla 7.17



Gráfica 7.17

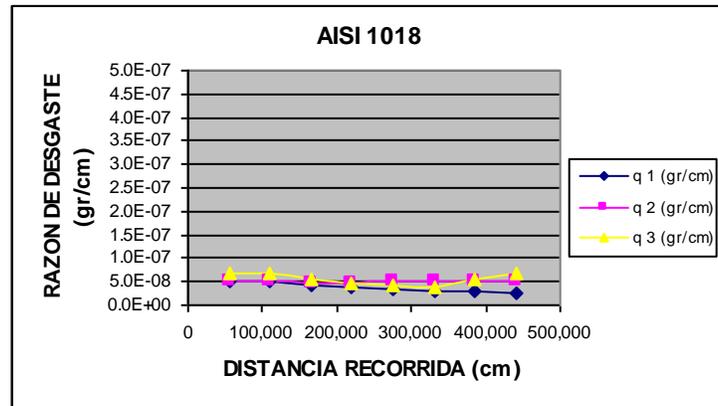
En la gráfica 7.17 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde el valor máximo, es de 1.1E-08 a 7.2E-08 (gr) a los 55135 (cm) recorridos.



A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
55135.0	5.0E-08	5.0E-08	6.9E-08
110269.9	5.0E-08	5.0E-08	6.9E-08
165404.9	4.2E-08	4.7E-08	5.4E-08
220539.8	3.8E-08	4.6E-08	4.7E-08
275674.8	3.3E-08	4.9E-08	4.1E-08
330809.7	2.9E-08	5.1E-08	3.7E-08
385944.7	2.8E-08	5.0E-08	5.5E-08
441079.6	2.7E-08	4.9E-08	6.8E-08

Tabla 7.18



Gráfica 7.18

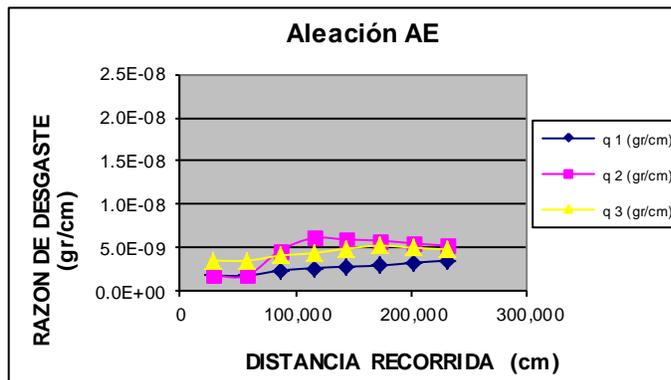
En la gráfica 7.18 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde el valor máximo, es de 5.0E-08 a 6.9E-08 (gr) a los 55135 (cm) recorridos.

**Probetas recubiertas Aleación AE (q).**

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	1.7E-09	1.7E-09	3.5E-09
57585.4	1.7E-09	1.7E-09	3.5E-09
86378.1	2.3E-09	4.6E-09	4.1E-09
115170.8	2.6E-09	6.1E-09	4.3E-09
143963.5	2.8E-09	5.9E-09	4.9E-09
172756.2	2.9E-09	5.8E-09	5.2E-09
201548.9	3.2E-09	5.5E-09	5.0E-09
230341.6	3.5E-09	5.2E-09	4.8E-09

Tabla 7.19



Gráfica 7.19

En la gráfica 7.19 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 2.6E-09 a 6.1E-09 (gr) a los 11570 recorridos.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
28792.7	3.5E-09	3.5E-09	5.2E-09
57585.4	3.5E-09	3.5E-09	5.2E-09
86378.1	2.9E-09	2.9E-09	4.1E-09
115170.8	2.6E-09	2.6E-09	3.5E-09
143963.5	2.1E-09	3.8E-09	3.8E-09
172756.2	1.7E-09	4.6E-09	4.1E-09
201548.9	1.7E-09	4.2E-09	4.2E-09
230341.6	1.7E-09	3.9E-09	4.3E-09

Gráfica 7.20

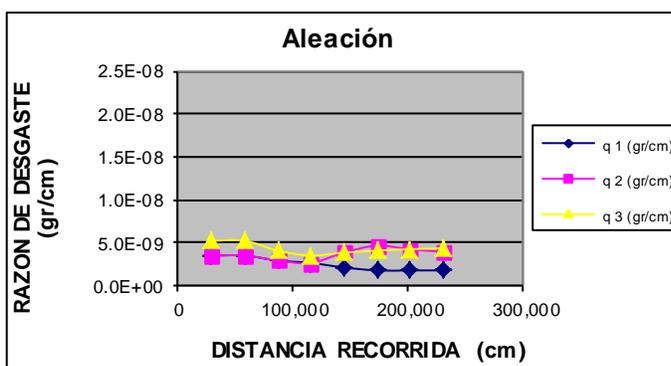


Tabla 7.20

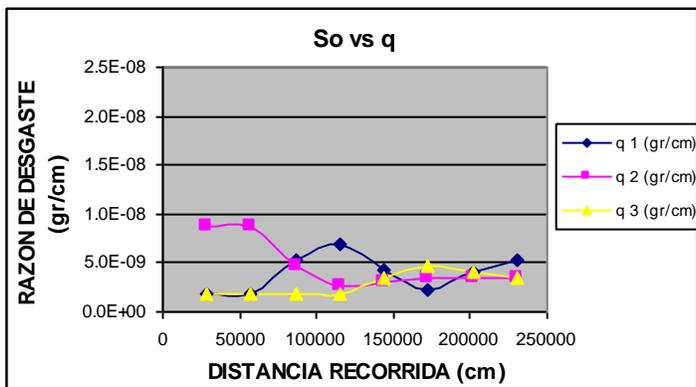
En la gráfica 7.20 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 3.5E-09 a 5.2E-09 (gr) a los 28792 recorridos.



A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
28792.7	1.7E-09	8.7E-09	1.7E-09
57585.4	1.7E-09	8.7E-09	1.7E-09
86378.1	5.2E-09	4.6E-09	1.7E-09
115170.8	6.9E-09	2.6E-09	1.7E-09
143963.5	4.2E-09	3.1E-09	3.5E-09
172756.2	2.3E-09	3.5E-09	4.6E-09
201548.9	4.0E-09	3.5E-09	4.0E-09
230341.6	5.2E-09	3.5E-09	3.5E-09

Tabla 7.21



Gráfica 7.21

En la gráfica 7.21 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 1.7E-09 a 8.7E-09 (gr) a los 28792 recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	3.6E-09	4.5E-09	7.3E-09
110269.9	3.6E-09	4.5E-09	7.3E-09
165404.9	4.5E-09	3.6E-09	5.4E-09
220539.8	5.0E-09	3.2E-09	4.5E-09
275674.8	4.9E-09	5.4E-09	5.1E-09
330809.7	4.8E-09	7.0E-09	5.4E-09
385944.7	4.0E-09	6.2E-09	5.2E-09
441079.6	3.4E-09	5.7E-09	5.0E-09

Gráfica 7.22

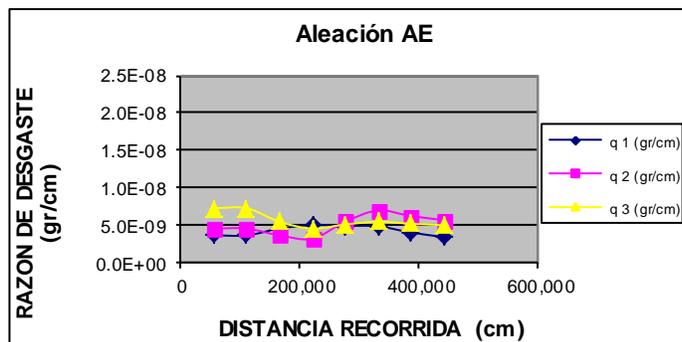


Tabla 7.22

En la gráfica 7.22 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 3.6E-09 a 7.3E-09 (gr.) a los 55135 recorridos.



A condiciones de 900 RPM y 300 gr. de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	2.3E-08	9.1E-09	1.1E-08
110269.9	2.3E-08	9.1E-09	1.1E-08
165404.9	2.1E-08	5.7E-09	4.8E-09
220539.8	2.1E-08	4.1E-09	1.8E-09
275674.8	1.7E-08	3.6E-09	2.0E-09
330809.7	1.5E-08	3.3E-09	2.1E-09
385944.7	1.4E-08	3.1E-09	2.5E-09
441079.6	1.3E-08	2.9E-09	2.7E-09

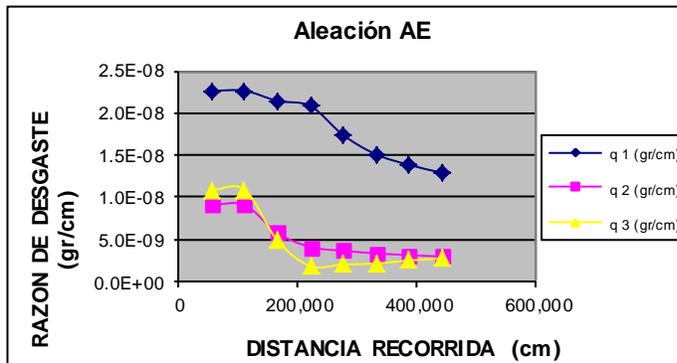


Tabla 7.23

Gráfica 7.23

En la gráfica 7.23 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 9.1E-09 a 1.1E-08 (gr.) a los 55135 (cm) recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	3.6E-09	0.0E+00	0.0E+00
110269.9	3.6E-09	0.0E+00	0.0E+00
165404.9	2.7E-09	1.2E-09	9.1E-10
220539.8	2.3E-09	1.8E-09	1.4E-09
275674.8	3.8E-09	1.8E-09	1.5E-09
330809.7	4.8E-09	1.8E-09	1.5E-09
385944.7	5.4E-09	1.7E-09	1.4E-09
441079.6	5.9E-09	1.6E-09	1.4E-09

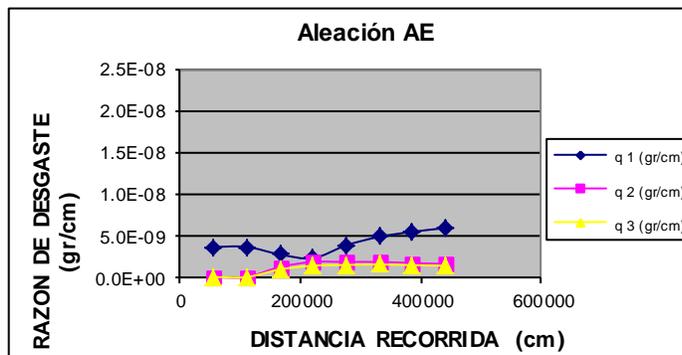


Tabla 7.24

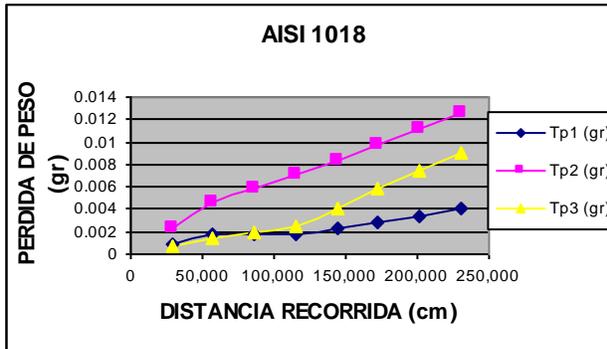
Gráfica 7.24

En la gráfica 7.24 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 5.4E-09 a 1.4E-08 (gr.) a los 441079 recorridos.

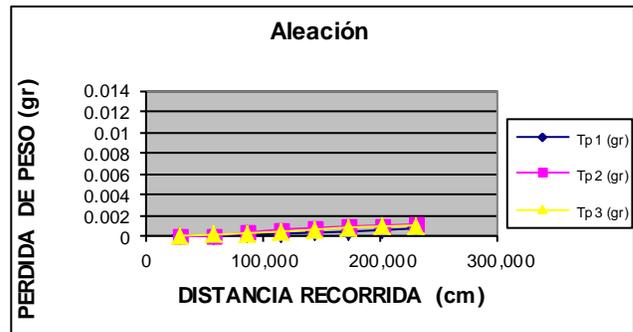


Comparación de pérdida de peso (Tp).

A condiciones de 470 RPM y 150 gr. de carga.



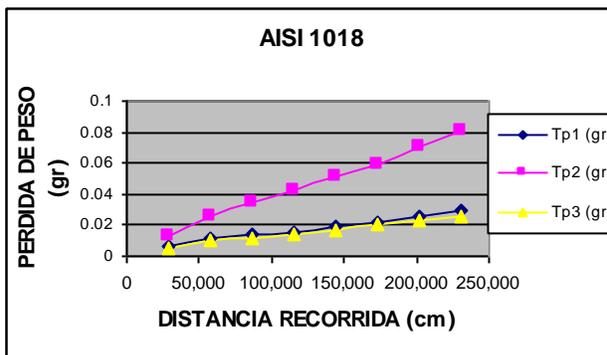
Gráfica 7.25



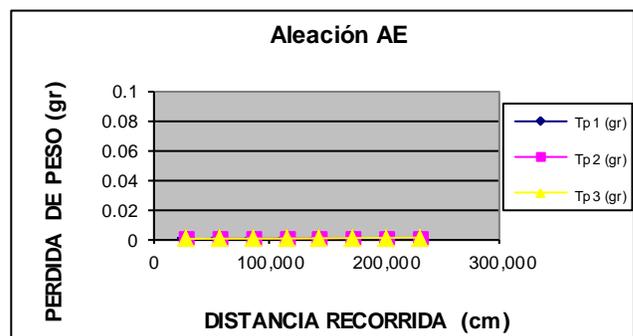
Gráfica 7.26

En la gráfica 7.25 y 7.26 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa la importancia del recubrimiento ya que el desgaste es muy inferior en las pruebas de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento a las mismas condiciones de prueba.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr. de carga.



Gráfica 7.27

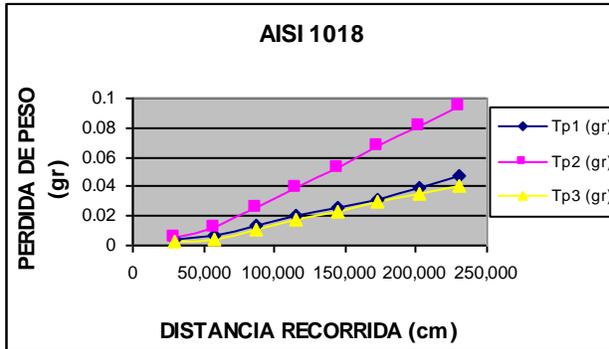


Gráfica 7.28

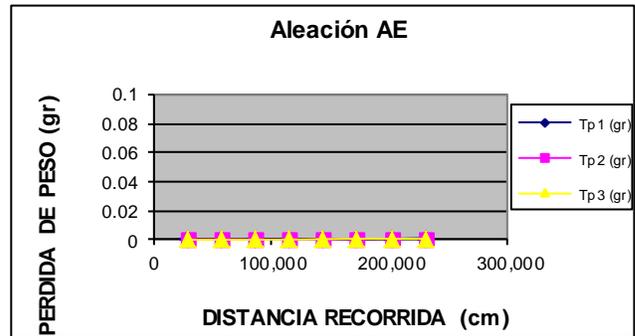
En la gráfica 7.27 y 7.28 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa la importancia del recubrimiento ya que el desgaste es muy inferior en las pruebas de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento aun incrementando la carga.



A condiciones de 470 RPM y 600 gr. de carga.



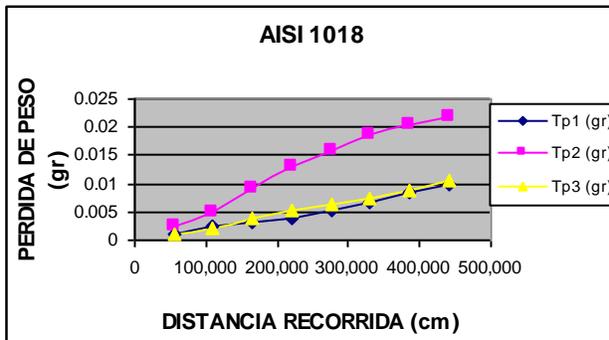
Gráfica 7.29



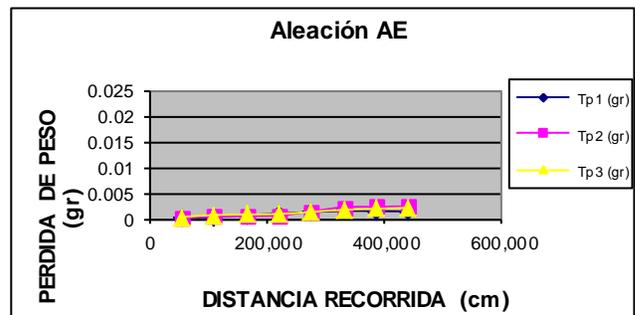
Gráfica 7.30

En la gráfica 7.29 y 7.30 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y con recubrimiento. Se observa que las probetas con recubrimiento sufren menos desgaste y por ende pérdida de peso comparadas con las probetas sin recubrimiento incrementando carga en la condición de prueba.

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.



Gráfica 7.31



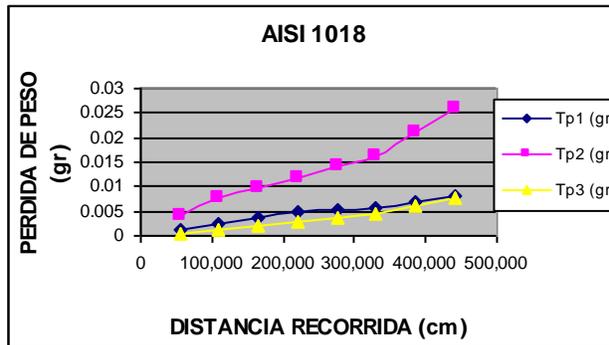
Gráfica 7.32

En la gráfica 7.31 y 7.32 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Se observa que al incrementar la velocidad la tendencia de las probetas con recubrimiento es menor desgaste en ellas que las que no cuentan con recubrimiento. La pérdida de peso es significativa, ya que para valores de distancia recorrida como 100, 000 cm para las

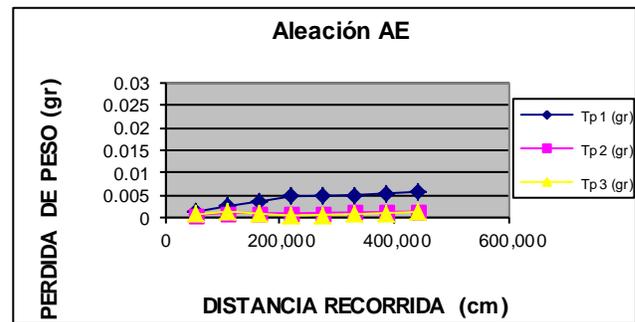


probetas sin recubrimiento es notable el desgaste y para este mismo valor la pérdida de peso para probetas con recubrimiento es cercano a cero.

A condiciones de 900 RPM y 300 gr. de carga.



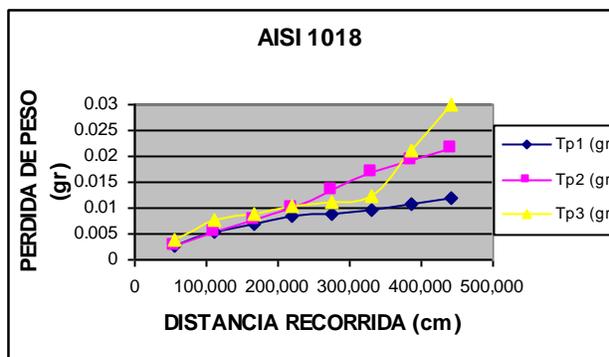
Gráfica 7.33



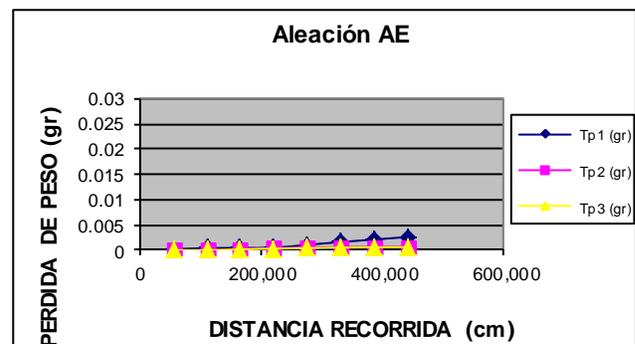
Gráfica 7.34

En la gráfica 7.33 y 7.34 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa la importancia del recubrimiento ya que el desgaste es muy inferior en las pruebas de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento a las mismas condiciones de prueba.

A condiciones de 900 RPM y 600 gr. de carga.



Gráfica 7.35



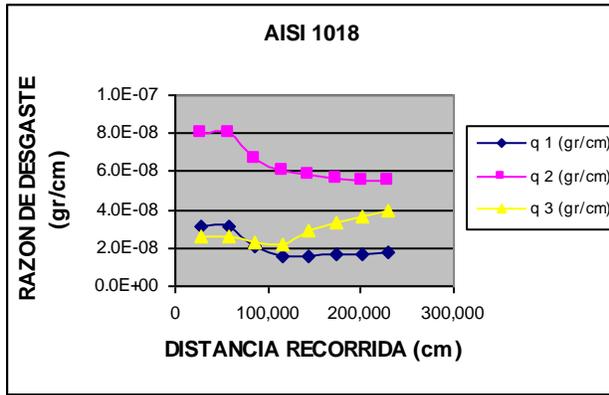
Gráfica 7.36

En la gráfica 7.35 y 7.36 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa la importancia que al incrementar la velocidad la pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento es mayor que las que cuentan con recubrimiento aun a más baja distancia recorrida.

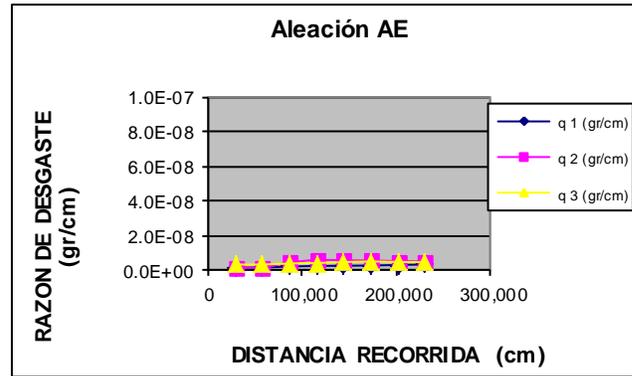


Comparación de razón de desgaste (q).

A condiciones de 470 RPM y 150 gr. de carga.



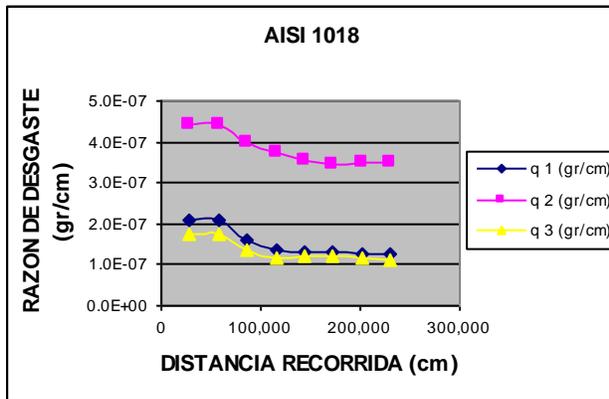
Gráfica 7.37



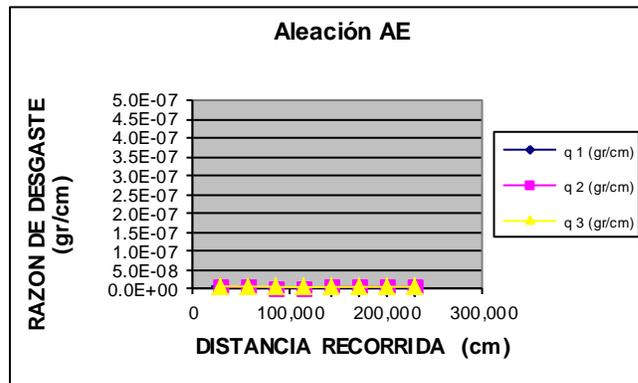
Gráfica 7.38

En la gráfica 7.37 y 7.38 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa la importancia del recubrimiento ya que la razón de desgaste es muy inferior en las probetas con recubrimiento que en aquellas sin recubrimiento a las mismas condiciones de prueba.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr. de carga.



Gráfica 7.39



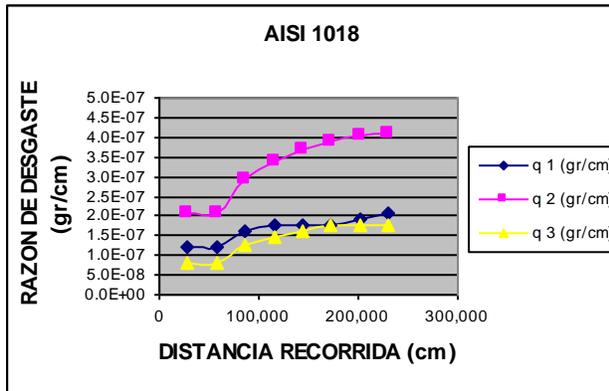
Gráfica 7.40

En la gráfica 7.39 y 7.40 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa la importancia del recubrimiento ya que el desgaste es muy inferior en las

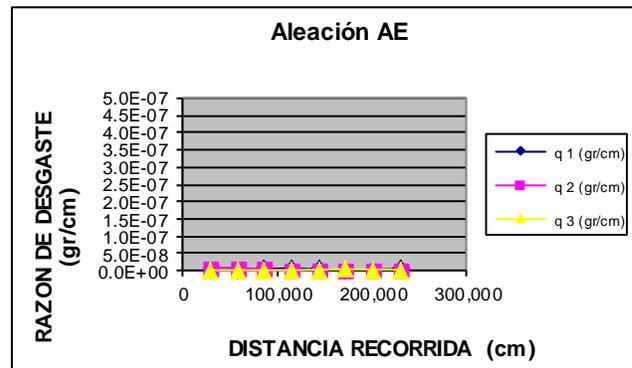


pruebas de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento a las mismas condiciones de prueba.

A condiciones de 470 RPM y 600 gr. de carga.



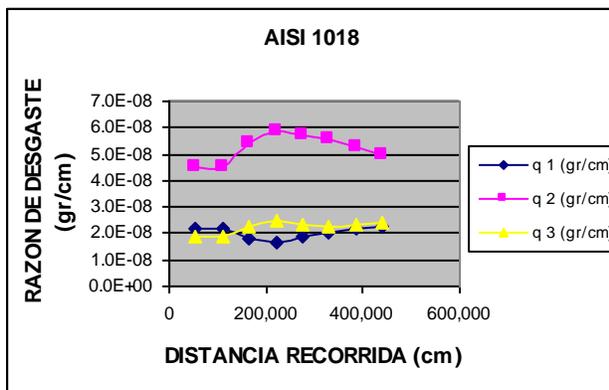
Gráfica 7.41



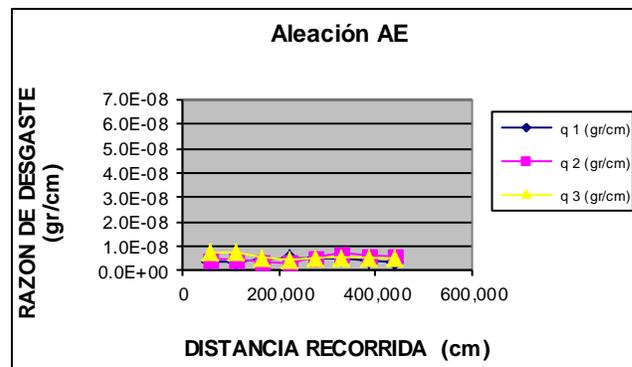
Gráfica 7.42

En la gráfica 7.41 y 7.42 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa que la razón de desgaste es muy superior en las probetas sin recubrimiento que aquellas recubiertas a las mismas condiciones de prueba.

A condiciones de 900 RPM y 150 gr. de carga.



Gráfica 7.43

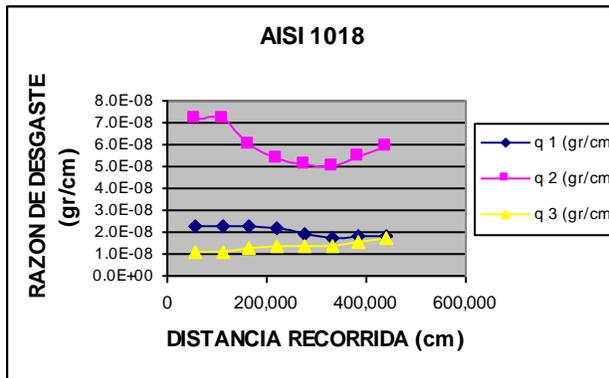


Gráfica 7.44

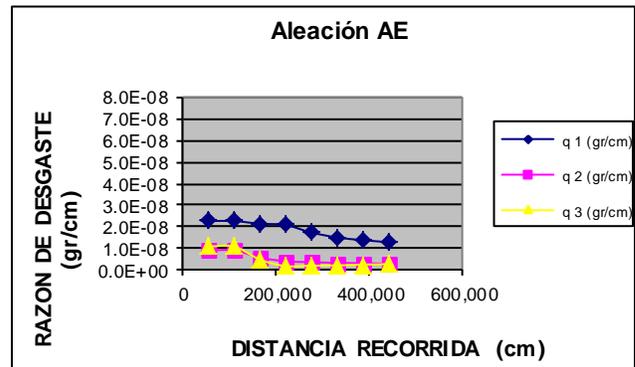
En la gráfica 7.43 y 7.44 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa que incrementando los valores de velocidad tienen un efecto mayor en la razón de desgaste en las probetas sin recubrimiento que en las que cuentan con recubrimiento.



A condiciones de 900 RPM y 300 gr. de carga.



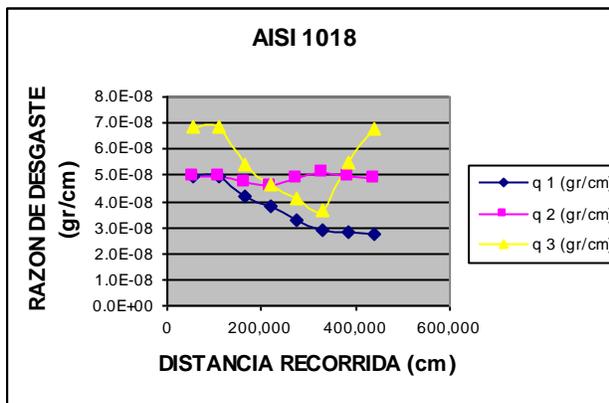
Gráfica 7.45



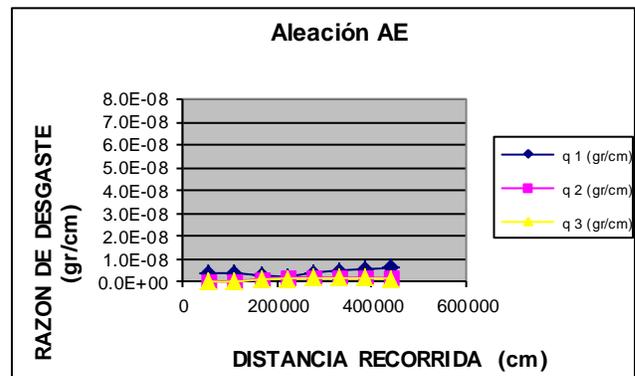
Gráfica 7.46

En la gráfica 7.25 y 7.26 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Con estos resultados se observa que incrementando la carga las probetas sin recubrimiento presentan una razón de desgaste mayor las probetas con recubrimiento.

A condiciones de 900 RPM y 600 gr. de carga.



Gráfica 7.47



Gráfica 7.48

En la gráfica 7.47 y 7.48 se puede apreciar la tendencia de pérdida de peso de las tres probetas sin recubrimiento y las tres con recubrimiento. Se observa que al incrementar la velocidad y la carga las probetas sin recubrimiento sufren un mayor desgaste que las que cuentan con recubrimiento y por ende la razón de desgaste es inferior en las probetas con recubrimiento.



7.5 COMPARACIÓN DE GRÁFICAS DE DESGASTE RELEVANTES

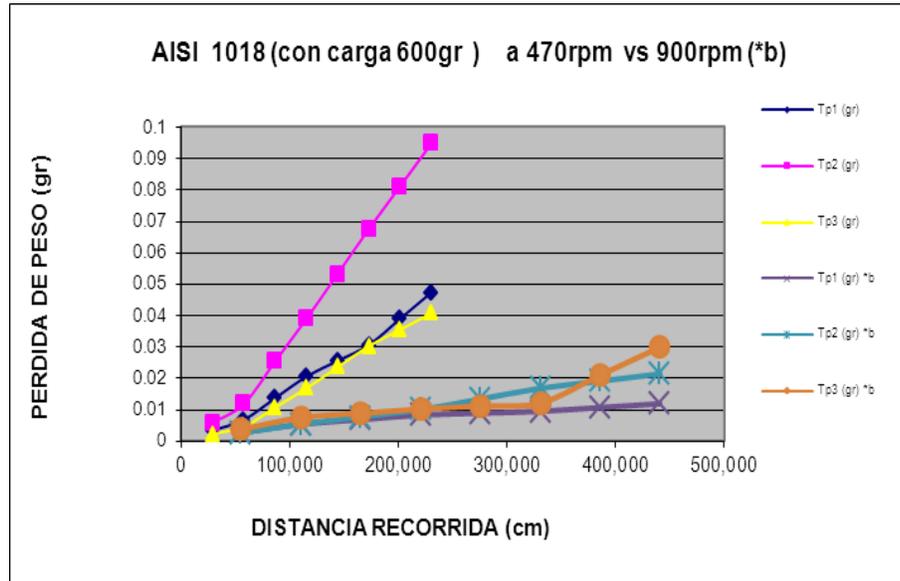
Al obtener probetas con las mejores condiciones de proyección en base al proceso automatizado y misma altura de espiga (pin), se han determinado parámetros adecuados para tener resultados confiables y repetitivos en los correspondientes ensayos de desgaste y en su comportamiento general bajo tales condiciones.

En la tablas 7.25 y 7.26 se presentan rangos de resultados máximos de pérdida de peso a las distancias recorridas para ambos materiales con recubrimiento, así como el del material base sin recubrir AISI 1018.

		AISI 1018		
		So=230,341	So=220,539	So=441,079
		(cm)	(cm)	(cm)
		470 rpm	900 rpm	900 rpm
Carga (gr)	Pérdida de peso máximo (gr)			
150	0.0040 - 0.0126	0.0037 - 0.0130	0.0099 - 0.0220	-
300	0.0258 - 0.0808	0.0030 - 0.0119	0.0076 - 0.0259	-
600	0.0408 - 0.0948	0.0084 - 0.0103	0.0120 - 0.0300	-

Tabla 7.25 Pérdida de peso máximo para probetas sin recubrir.

Los resultados de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento muestran que con carga de 600 gr. y 470 RPM se presentan valores máximos de pérdida de peso a los 230,341 cm. Si comparamos a una distancia recorrida cercana (220,539 cm) y carga aplicada (600 gr.), pero a 900 RPM resulta que está por debajo de los valores máximos obtenidos a 470 RPM, por lo menos 9 veces menos. Esto se nota con mayor detalle en la gráfica de la figura 7.49 con las condiciones de prueba en donde se manifestaron las máximas pérdidas de peso comparándolas con la gráfica de la figura 7.49(*b) en donde cambia únicamente la velocidad a 900 RPM.



Gráfica 7.49. Efecto de la velocidad en la pérdida de peso de muestras de aceros 1018 sin recubrimiento con carga de 600 gr.

En la gráfica 7.49, se observa la comparación entre tres probetas ensayadas a 470 rpm con carga de 600 gr. comparadas contra tres probetas ensayadas a 900 rpm con carga de 600 gr. Se destaca que las tres probetas ensayadas a 470 rpm sufren mayor desgaste que aquellas ensayadas a 900 rpm. Este fenómeno se conserva aun aumentando la distancia recorrida por las probetas ensayadas a 900 rpm.

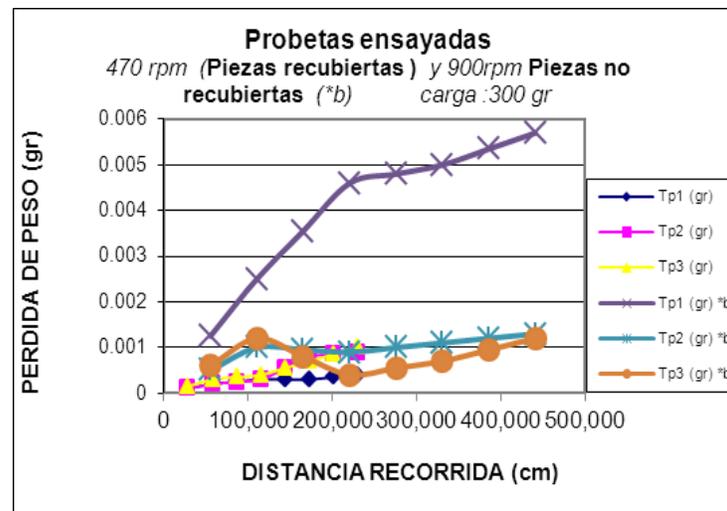
PROBETAS RECUBIERTAS					
		<i>So=230,341 (cm)</i>		<i>So=220,539 (cm)</i>	
		<i>470 rpm</i>		<i>900 rpm</i>	
		<i>So=441,079 (cm)</i>			
		<i>900 rpm</i>			
Carga (gr)	Pérdida de peso máximo (gr)				
150	0.0008	-	0.0007	-	0.0015
	0.0012		0.0011		0.0025
300	0.0004	-	0.0004	-	0.0012
	0.0010		0.0046		0.0057
600	0.0008	-	0.0003	-	0.0006
	0.0012		0.0005		0.0026

Tabla 7.26 Pérdida de peso máximo para probetas con recubrimiento.



Los resultados de pérdida de peso de las probetas con recubrimiento, muestran que con una carga de 300 (gr.) y 900 RPM se presentan valores máximos de pérdida de peso a los 220,539 (cm).

También se puede observar que si se disminuye las rpm para este valore de carga la pérdida de peso también disminuye esto lo podemos apreciar en la gráfica 7.50

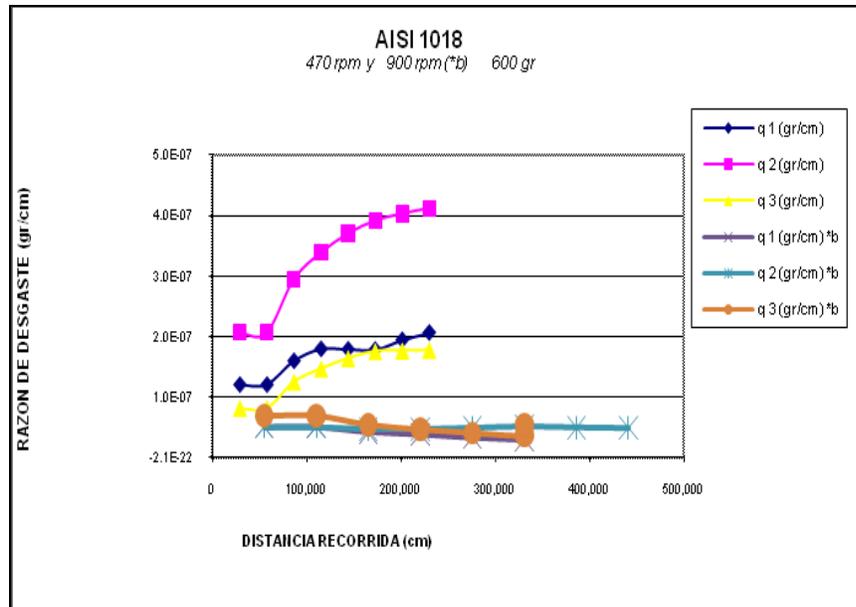


Gráfica 7.50 Comparación de probetas sin y con recubrimiento

En la gráfica de la figura 7.50 se observa una comparación entre pruebas a 470rpm y 900 rpm (*b) donde la probeta 1 destaca en la pérdida de peso mientras que las otras mantienen el mismo rango de peso, de esta forma se tiene que a los 220,539 cm recorridos, el rango de pérdida de peso es de 0.0004 a 0.0046 gr. para el doble de distancia recorrida (441,079 cm.) tenemos que su pérdida de peso es de 0.0012 a 0.0057 cm. Estos datos son los máximos de todas las condiciones de experimentación.

A diferencia de las probetas sin recubrir en donde se obtuvieron las máximas pérdidas de peso a menores revoluciones y mayor carga, las probetas con recubrimiento manifestaron las máximas de pérdida de peso a mayores revoluciones y carga media de 300 gr.

La gráfica 7.51 muestran el comportamiento de razón de desgaste para las probetas AISI 1018, en las mismas condiciones que en la pérdida de peso ya mostradas.

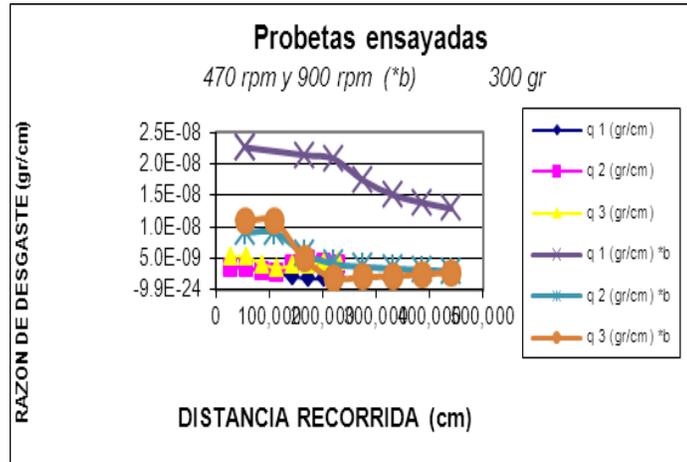


Gráfica 7.51 Comparación de probetas a diferentes velocidades

En la gráfica 7.51 se puede apreciar la tendencia positiva de razón de desgaste de las tres primeras probetas en donde la máxima, es de 1.8×10^{-07} a 4.1×10^{-07} gr. a los 230341 cm. recorridos.

En la gráfica también se puede apreciar la tendencia negativa de razón de desgaste de las tres probetas ultimas probetas (*b) en donde la máxima, es de 5.0×10^{-08} a 6.9×10^{-08} gr. a los 55135 cm. recorridos.

La gráfica 7.52 muestra el comportamiento de razón de desgaste para las probetas recubiertas, en las mismas condiciones que en la pérdida de peso ya mostradas.



Gráfica 7.52 Probetas con recubrimiento misma carga velocidad variada

En la gráfica 7.52 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 3.5×10^{-09} a 5.2×10^{-09} gr. a los 28,792 cm. recorridos es decir en el primer intervalo de tiempo o lectura.

En la gráfica también se puede apreciar que para las 900rpm la tendencia negativa de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 9.1×10^{-09} a 1.1×10^{-08} gr. a los 55,135 cm. recorridos en el primer intervalo de tiempo o lectura.

Micrografías de las muestras

Las micrografías que se presentan a continuación fueron tomadas en un microscopio electrónico de barrido Marca Phillips XL20 y corresponden a imágenes de las probetas sometidas a los ensayos de desgaste con recubrimiento con la aleación AE (Ni, Cr, Fe, B, Si) y probetas sin recubrir.

Imágenes de probetas recubiertas Aleación AE

Se puede observar en las micrografía de 100 aumentos la forma en que se van depositando los gotas fundidas o splats, (el material esférico), en la proyección, lo cual da indicaciones acerca de los parámetros que se deben modificar para que no haya traslapes o huecos en el recubrimiento. En las micrografías de 200 y 400 aumentos se puede observar algo de porosidad entre los splats.

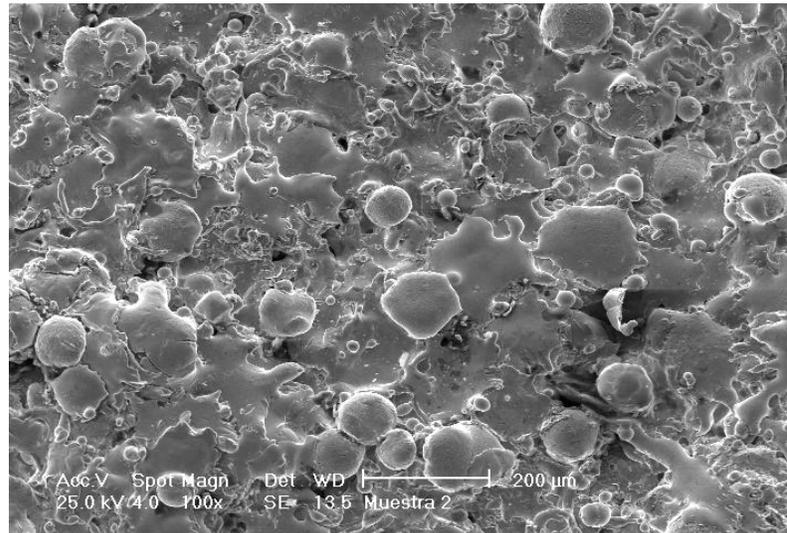


Figura 7.14 Aspecto superficial de un recubrimiento NiCrSiBFe mostrando la morfología de los splats obtenidos por proyección térmica automatizada sobre acero AISI 1018. Imagen de electrones secundarios. 100X.

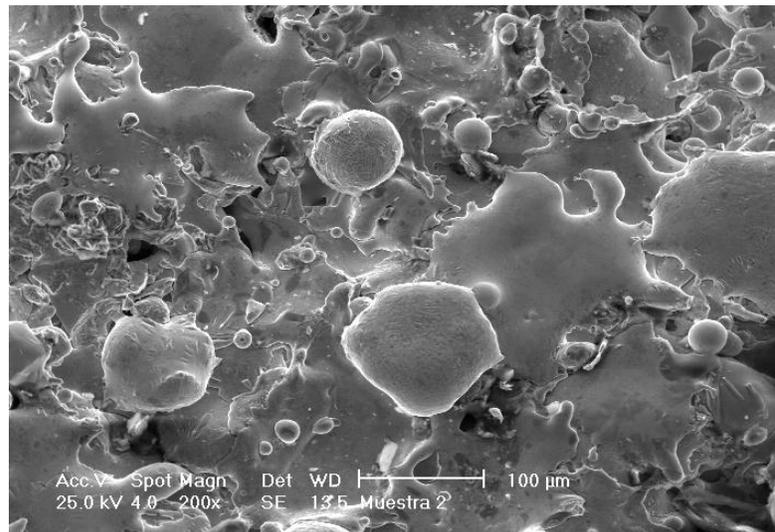


Figura 7.15 Aspecto superficial de un recubrimiento NiCrSiBFe mostrando, con mayor detalle, la morfología de los splats obtenidos por proyección térmica automatizada sobre acero AISI 1018. Imagen de electrones secundarios. 200X.

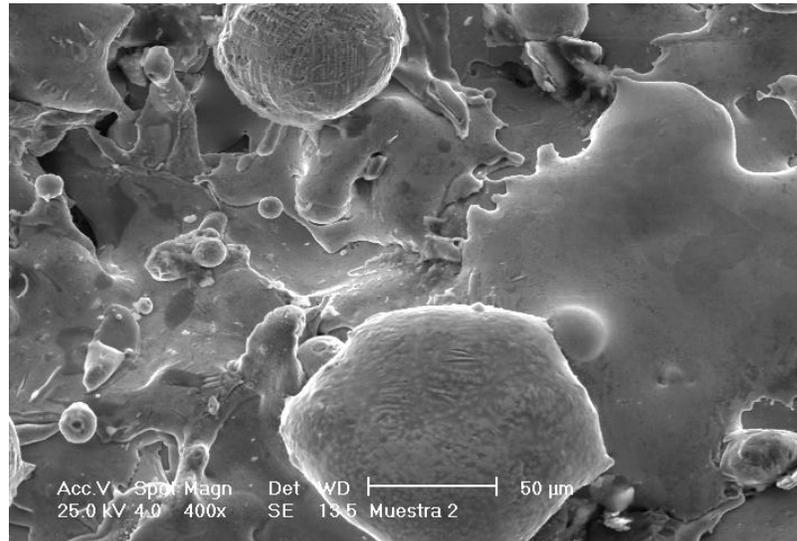


Figura 7.16 Aspecto superficial de un recubrimiento NiCrBSiFe mostrando, con mayor detalle, la morfología de los splats obtenidos por proyección térmica automatizada sobre acero AISI 1018, se observa el acomodo de los splats y la presencia de porosidad. Imagen de electrones secundarios. 400X.

Se obtuvieron imágenes de las probetas sin desgaste y sometidas a desgaste en un macroscopio de marca Wild Photo Macrosk modelo M400 con un rango de resolución de (6.3 – 32) X. para poder observar el tipo de desgaste manifestado en los ensayos como se observa en la figura 7.14.



Figura 7.17 Probeta 2 c/ recubrimiento, tiempo de rociado= 1.5 min. sin carear c/ desgaste a 8X, se aprecia que después de la prueba de desgaste se conserva el recubrimiento con las marcas de desgaste aunque hay aglomeramiento en la periferia de los splats debido a la velocidad empleada en el ensayo. El recubrimiento tiene buen desempeño al desgaste (vista lateral)

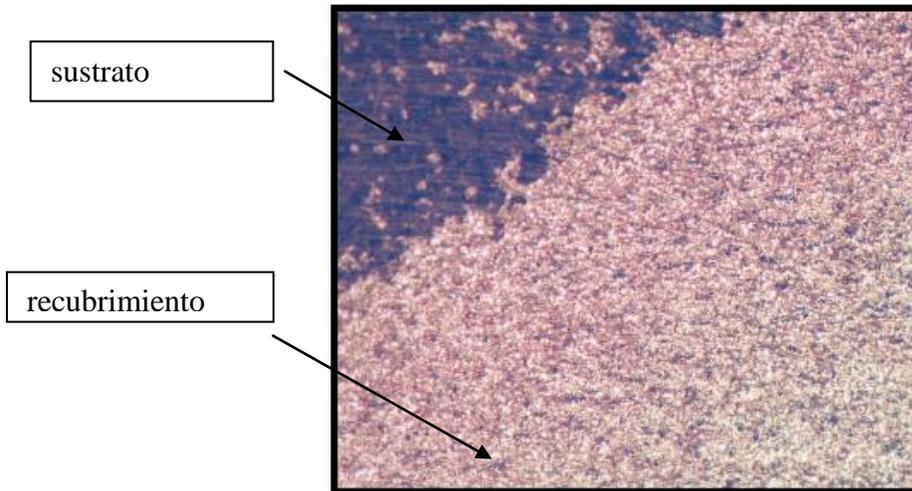


Figura7.18 Aspecto del recubrimiento NiCrSiBFe obtenido mediante proyección térmica automatizada. Tiempo de rociado rociado= 1.5 min. Sin carear , luego del ensayo de desgaste. Se aprecia la zona desgastada y la zona cerca de la periferia del sustrato. 25X

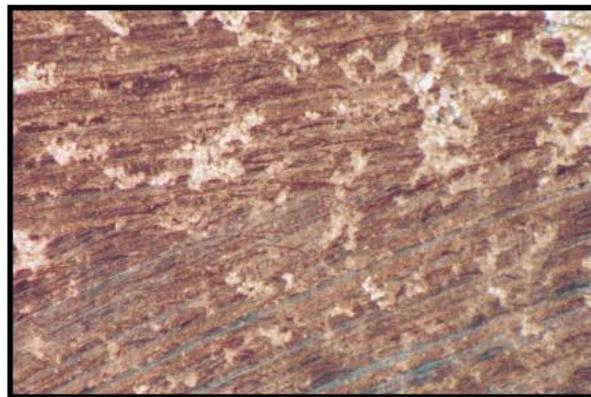


Figura7.19 Aspecto del recubrimiento NiCrSiBFe obtenido mediante proyección térmica automatizada. Tiempo de rociado rociado= 1.5 min. sin carear , luego del ensayo de desgaste. En la imagen se observan surcos característicos del desgaste, con diferentes planos de desgaste.

También se tomaron micrografías en un microscopio electrónico de barrido Marca Phillips modelo XL de la probeta sin desgaste y después de la prueba de desgaste como se puede observar en las figuras 7.20 y 7.21.

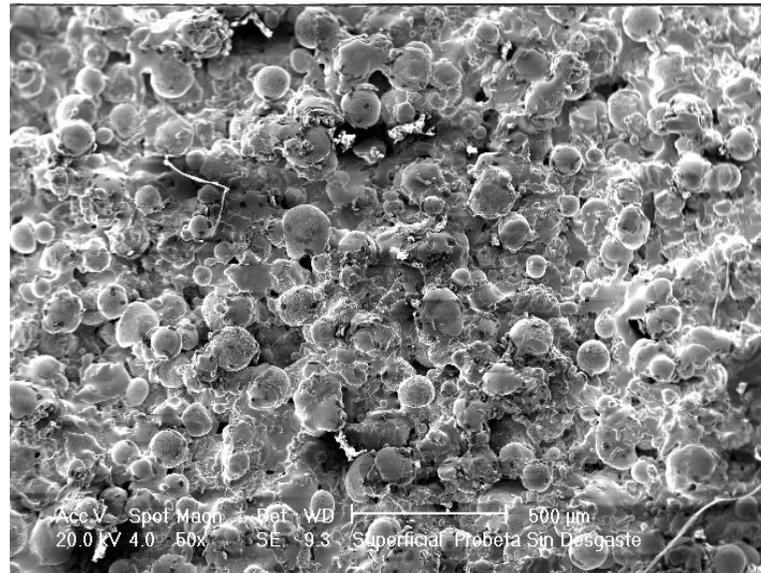


Figura 7.20 Imagen de electrones secundarios del aspecto superficial del revestimiento NiCrBSiFe obtenido mediante proyección térmica automatizada. Conviene destacar la "densidad" de SPLATS. 50X.

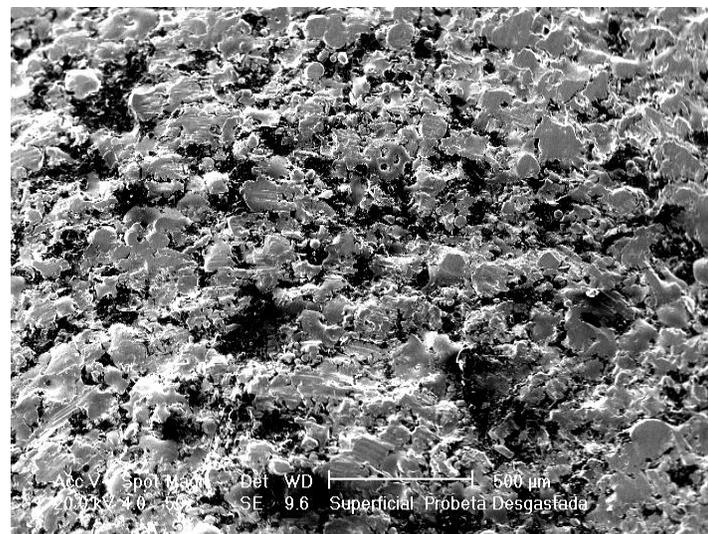


Figura 7.23 Imagen de electrones secundarios del aspecto superficial del revestimiento NiCrBSiFe obtenido mediante proyección térmica automatizada (tiempo de rociado 1.5 minutos), luego de ser sometida a careado y posterior ensayo de desgaste adhesivo. El revestimiento se ha aplanado y no hay evidencia de surcos en la capa, lo que avalaría una adecuada resistencia al desgaste.

Queda evidenciado que el recubrimiento contribuye de modo relevante a mejorar la resistencia al desgaste y que, si el proceso



7.6 APLICACIONES A FUTURO

Se puede considerar que este proyecto da pie al surgimiento de nuevas aplicaciones del proceso y gracias a la automatización, se pueden controlar parámetros que son de suma importancia para la acentuación en ciertos casos específicos como son:

- Hidroxiapatita, que se utiliza para los injertos en huesos, esto ayudará a que se obtenga un recubrimiento específico y controlado en diferentes tipos de prótesis.
- Automatización de otros equipos de proyección térmica para aplicar la metodología propuesta y generar recubrimientos de calidad mayor al proceso tradicional.
- Realizar el rociado mediante dos técnicas o más para obtener materiales compuestos con diferentes condiciones de variables y parámetros para obtener mejores propiedades en los materiales recubiertos.
- Aplicar la metodología propuesta con diferentes técnicas de rociado y diferentes sustratos para ampliar el campo de aplicación de la proyección térmica.
- Realizar la deposición con el sistema de brazo automatizado, pero generando capas de adición de material sucesivas para obtener piezas formadas a medida directamente con el proceso de proyección y no solo como recubrimiento.
- Llevar a cabo rociados térmicos sobre piezas a medida, como el caso de piezas generadas por procesos de prototipado rápido para mejorar las propiedades y resistencia mecánica de los prototipos.
- Aplicar el rociado térmico a moldes de inyección generados por prototipado rápido para el desarrollo de piezas en corto tiempo.



- Aplicar rociado térmico a piezas que se utilicen como herramientas para el proceso de electroerosión facilitando la generación de electrodos utilizando procesos de remoción o adición como es el caso del prototipado rápido.
- Aleaciones Zn-Al-Cu para aplicaciones de anticorrosión, esto para la utilización de equipo que se encuentra en altos niveles de corrosión en atmósferas de trabajo, especialmente de tipo salino.
- Combinaciones de cerámicos para resistencia al desgaste, aplicado básicamente en aquellas piezas que están expuestas a la fricción y aunque se tenga un lubricante aplicado en las piezas en fricción, aun así se llegan a dañar o desgastar en alguna de sus partes.
- Debido al nivel de salinidad y de humedad existente en la industria hotelera en zonas costeras, en las casas construidas sobre las playas, la utilización de gabinetes de control para distribución eléctrica, telefónica y para otras aplicaciones sin importar el tipo de protección, se ven afectados debido a la corrosión. Para ello, se pueden utilizar distintos recubrimientos para una adecuada protección. Y no solo en gabinetes, también se pueden aplicar recubrimientos para lanchas, barcos y otros transportes marinos.

Existe un sin fin de opciones que se pueden acceder a la aplicación de este proceso ya que por el carácter de aplicación que tiene no presenta muchas dificultades para su uso en diferentes áreas de trabajo.



CAPÍTULO VIII

Conclusiones

De acuerdo a los resultados derivados del trabajo de investigación, se puede afirmar que se logró obtener satisfactoriamente el objetivo de conseguir la automatización del proceso de proyección térmica.

Los recubrimientos conseguidos fueron caracterizados de modo amplio, por medio de microdureza, resistencia al desgaste y por microscopía electrónica de barrido y análisis químico.

Se desarrolló e implementó una metodología novedosa que permitirá la generación de recubrimientos con espesores uniformes homogéneos.

Dentro del desarrollo de la metodología una aportación relevante de este trabajo es la aplicación del diagnóstico por medio de la generación y observación del patrón de rociado.

Otro de los puntos destacables de aporte de este trabajo en la metodología para realizar recubrimientos uniformes es el relacionado con el uso de trayectorias de deposición, ya que con ello no solo se consigue una mejora en cuanto a la homogeneidad y calidad uniforme del recubrimiento, sino también al tiempo de proceso.

También fue posible mejorar la calidad del recubrimiento, minimizando la porosidad, aumentando la adherencia e incrementando la uniformidad de espesor gracias a los parámetros utilizados en la automatización (comparado, incluso, con otras fuentes como las reportadas por empresas del ramo tales como Sulzer Metco)

Al realizar mediciones de dureza en el material base y en el recubrimiento se observó que se puede alcanzar el triple del valor de dureza con la aleación utilizada en la deposición.

Con el equipo automatizado, se logró un acabado más uniforme de una calidad mucho mayor que con el proceso manual, en un tiempo menor.



Asimismo, una vez que se automatizó el proceso se encontró que se puede obtener un espesor en toda la superficie de la probeta de 0.5 mm sin falta de material y con un acabado más uniforme y de mejor calidad, lo que nos indica que efectivamente se estaba logrando con el cometido que era el de agilizar el proceso y la obtención de productos con calidad. Esto muestra que se pueden lograr revestimientos de mayor precisión en piezas que así lo requieran y darle un espesor uniforme y de mayor exactitud.

Gracias a la automatización del proceso de proyección térmica se pudieron controlar significativamente los parámetros de rociado dando mejores condiciones de homogeneidad de los recubrimientos y control de espesor más constante comparado con el proceso convencional y el reportado por otras fuentes.

El tiempo óptimo de rociado térmico automatizado obtenido donde el recubrimiento es estable es de 1.5 minutos con un espesor de 1.3 mm. En este tiempo se presentan las mejores características de homogeneidad y espesor más uniforme del recubrimiento. Más allá de 3 minutos de proceso automatizado, el recubrimiento se vuelve no homogéneo y se empieza aglomerar en diferentes zonas más cantidad de partículas, haciéndose irregular observando un espesor cercano a los 3 mm, lo cual establece un comportamiento lineal entre espesor y tiempo de proceso. También se puede establecer en base al control de los parámetros que realizando un postratamiento a la muestra, tal como reacondicionando la superficie, es posible conseguir un mayor espesor.

El recubrimiento redujo el desgaste del material base (AISI 1018) en por lo menos 70 veces en condiciones máximas experimentales (470 rpm y 600 gr.), la mayor resistencia al desgaste en el recubrimiento se debe, a las propiedades mecánicas del mismo, comenzando por su dureza (29 HRC), resistencia a mecanismos de desgaste, tales como el adhesivo, por fatiga y principalmente el abrasivo.

Los mecanismos de desgaste que dan lugar a los distintos tipos de desgaste, se presentan de manera conjunta y no aislada. Aunque es difícil reconocer el tipo de desgaste, se puede concluir por el tipo de huellas dejadas en las probetas y la pérdida de masa durante el deslizamiento, que es, predominantemente, de tipo abrasivo.

Se llevó a cabo, de manera exitosa, el diseño, la construcción y el ensamble de elementos que fueron funcionales para alcanzar una adecuada automatización del proceso.

Dentro de las consideraciones más importantes que se deben de tomar en cuenta para la automatización del proceso de proyección térmica se pueden mencionar la calibración de las piezas acopladas a la pistola (calibración de interruptores de la chispa y del motor, distancias del actuador del gatillo hacia el gatillo).



Fue conveniente crear programas por medio de ROBOT con una diversidad de trayectorias y gracias a ello fue posible la estructuración adecuada para realizar la proyección térmica automatizada que produjo una mayor precisión y repetitibilidad del proceso y de los recubrimientos evaluados.

El proceso realizado es válido para aplicarlo de forma convencional, automatizado y variando la técnica de proyección térmica

Como punto final se puede concluir que el proyecto de automatización realizado da como resultado una gran ventaja para la industria ya que se logra sustituir la mano del hombre provocando con ello una reducción de costos de producción y mantenimiento, la minimización de accidentes, el ahorro económico al disminuir el material desperdiciado, la eliminación de la fatiga del hombre y por consiguiente el simple beneficio al consumidor.

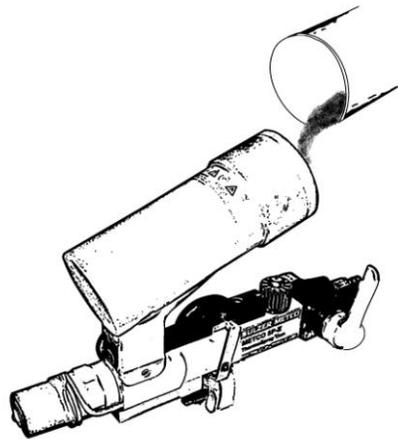


Apéndice A

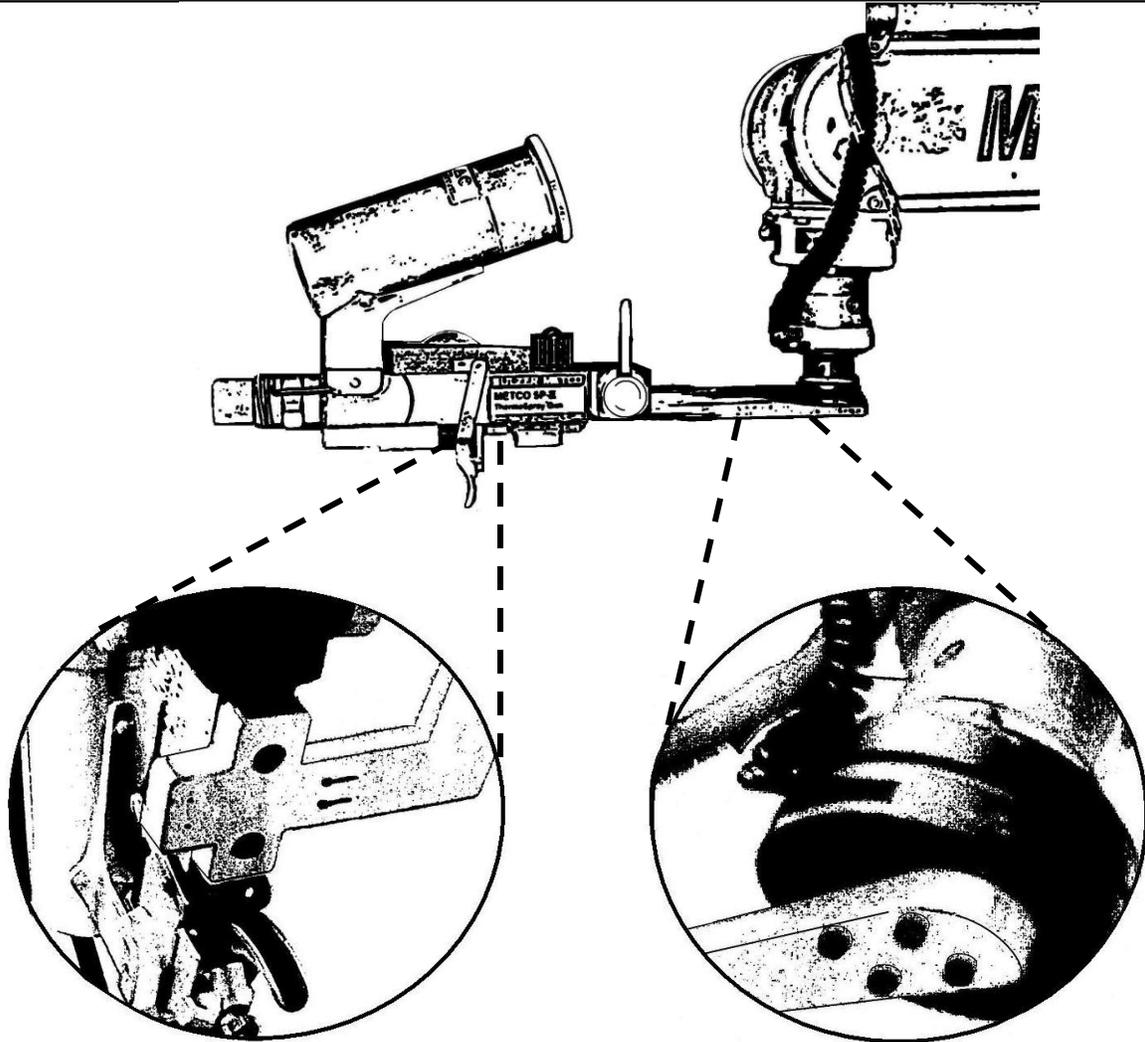
Manual de operación

MANUAL DEL PROCESO DE AUTOMATIZACIÓN

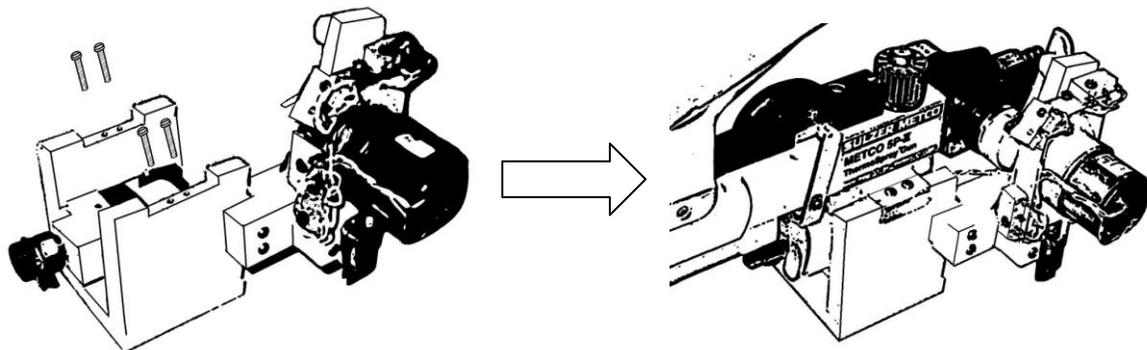
1. Colocar el material de rociado en el compartimiento de la pistola rociadora.



2. Montar la pistola al brazo mecánico por medio del soporte de la pistola rociadora, colocando los tornillos como se observa en la figura.

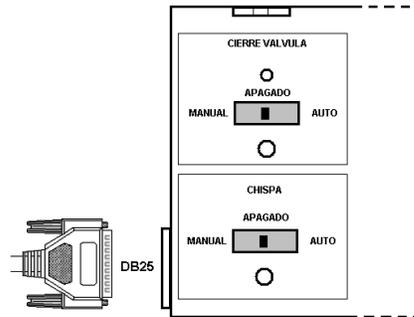


3. Montar la carcasa del sistema de automatización a la pistola rociadora por medio de los cuatro orificios colocados en la parte superior de la carcasa, teniendo la válvula de apertura de gas cerrada.

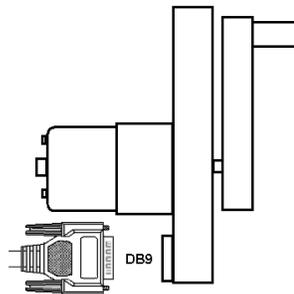




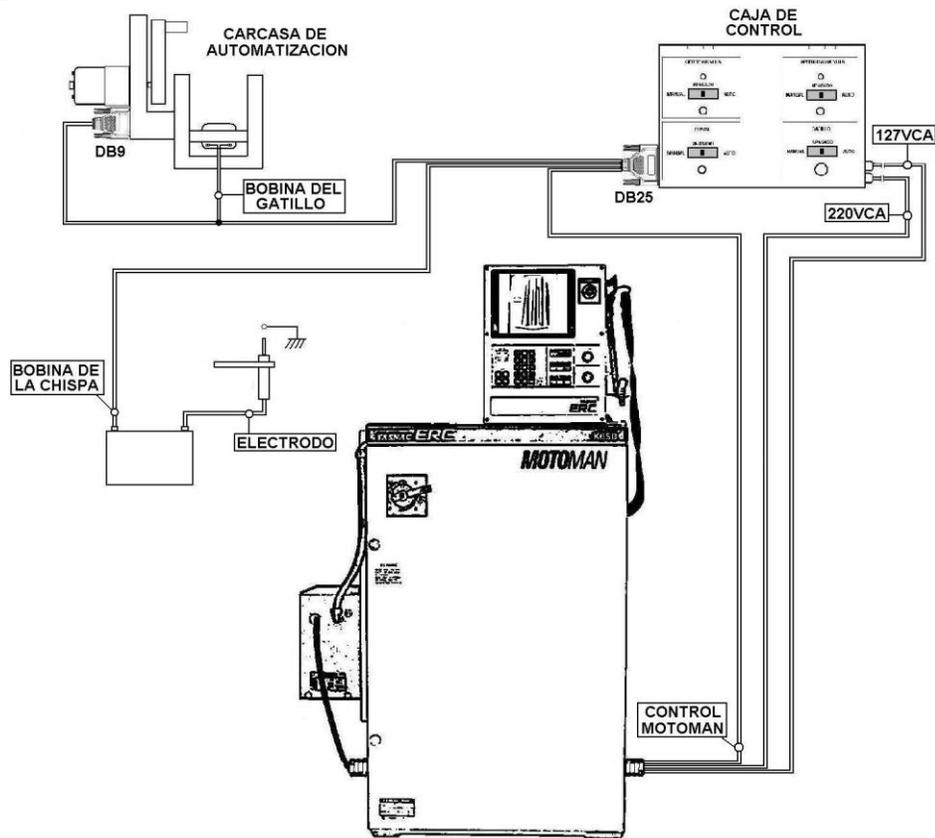
4. Conectar la entrada DB25 a la caja de control colocada encima del MOTOMAN



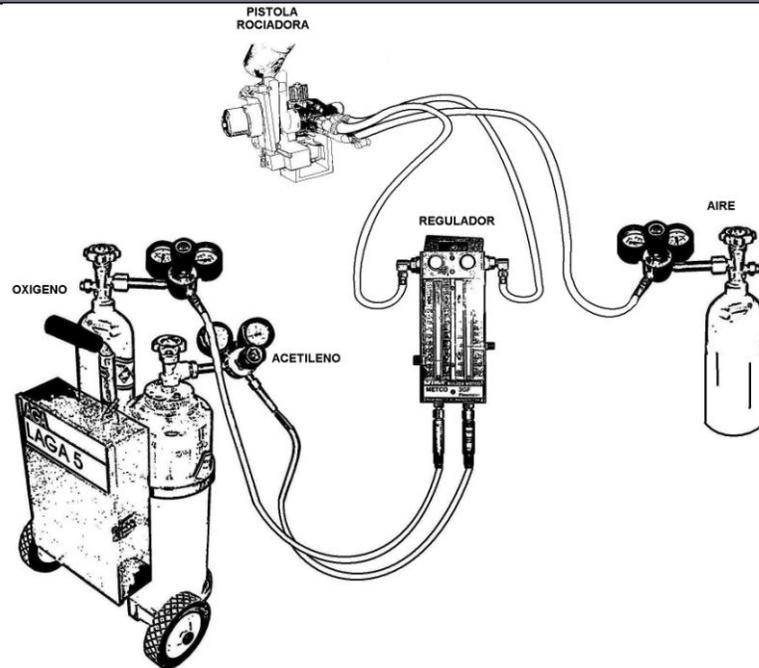
5. Conectar la entrada DB9 a la carcasa de automatización de la pistola rociadora.



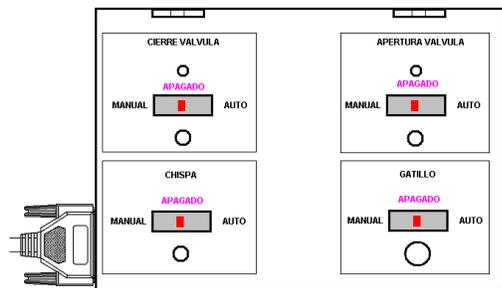
6. Conectar las conexiones marcadas como “Bobina de la chispa” a la bobina de la chispa.
7. Conectar las conexiones marcadas como “Control Motoman” al MOTOMAN.
8. Conectar las conexiones marcadas como “Bobina del gatillo” a la carcasa de automatización.



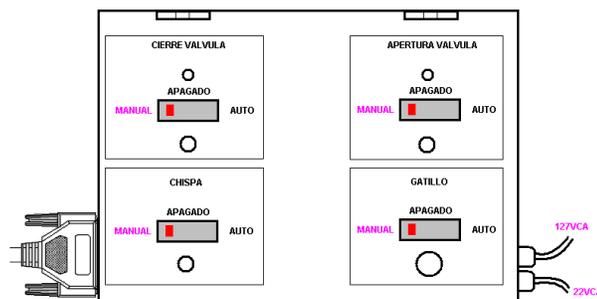
9. Conectar las mangueras a la pistola rociadora, los cuales proporcionaran los gases para el proceso.
10. Conectar las mangueras a los tanques de gas, así como al regulador de flujo.



11. Conectar la caja de control al suministro eléctrico no sin antes observar que los switches se encuentren en posición APAGADO.

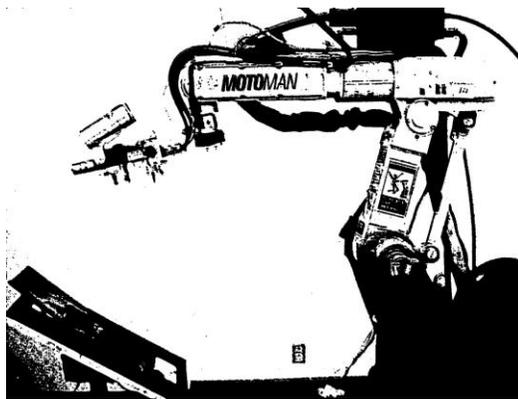


12. Colocar en posición MANUAL los switches de la caja de control.

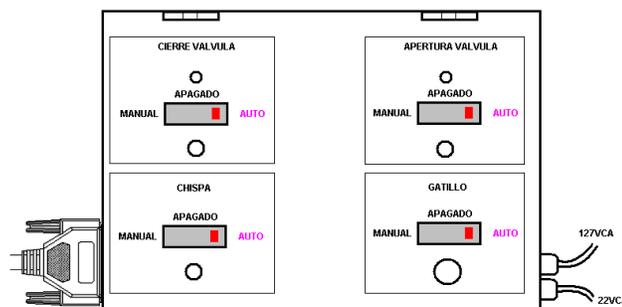




13. Realizar pruebas de apertura y cierre de gas, encendido de chispa y encendido de gatillo con la ayuda de la caja de control. En caso de existir el mal funcionamiento revisar las conexiones.
14. Colocar la mesa de trabajo en el lugar indicado.
15. Encender el MOTOMAN colocando el brazo mecánico en su posición original.



16. Abrir el tanque de aire comprimido con una presión de salida de 2 a 3 bar.
17. Abrir el tanque de acetileno a 0.5 bar en el manómetro de salida.
18. Abrir el tanque de oxígeno a 2 bar en el manómetro de salida.
19. Observar si existe alguna fuga de gas, en caso de existir alguna, revisar las conexiones.
20. Colocar los switches de la caja de control en posición AUTO.



21. Seleccionar el programa necesario para la aplicación deseada.



22. Correr el programa que se requiera por medio del MOTOMAN.
23. Finalizado el proceso, colocar en posición APAGADO los switches de la caja de control.
24. Colocar el MOTOMAN en posición APAGADO.
25. Cerrar el tanque de oxígeno.
26. Cerrar el tanque de gas.
27. Colocar en posición MANUAL la caja de control.
28. Abrir la válvula de gas para permitir la salida de gas rezagado en la pistola por medio del botón apertura de gas.
29. Cerrar el tanque de aire comprimido.
30. Colocar en posición APAGADO la caja de control.
31. Desconectar las mangueras y toda conexión.
32. Desmontar la carcasa del sistema de automatización.
33. Desmontar la pistola rociadora junto con el soporte de ésta.



Apéndice B

Código CNC, para fabricar probeta para ensayos de desgaste y propiedades de recubrimientos.

00111.LAT

N0000 G53 G56 G71 G94
 N0010 G92 S1000
 N0020 G00 X87.630 Z194.437
 N0030 G92 X0.0 Z100
 N0040 G59 T0303
 N0050 G96 S60 M04
 N0060 G00 X19.5 Z3.0
 N0070 G84 X18.0 Z-19.4 D3=500 F100
 N0080 G00 X18.0 Z3.0
 N0090 G84 X13.0 Z-12.4 D3=600 F100
 N0100 G53 G56 T0100
 N0110 G00 X87.630 Z194.437
 N0120 G59 T0202 G92 S800
 N0130 X14.0 Z-4.8
 N0140 X10.8 Z-7.8 D3=250 D4=10 D5=3000 F60
 N0150 X21.0 Z-7.8
 N0160 X20.0 Z-15.4
 N0170 G86 X0.5 Z-18.4 D3=250 D4=10 D5=3000 F60
 N0180 G53 G56 T0200
 N0190 G00 X23.0 Z-18.4
 N0200 G00 X87.630 Z-18.4
 N0210 M05
 N0220 M30

PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS

Tipo de recubrimiento.	Rociado térmico por combustión de alambre	Rociado térmico por combustión de polvos	Rociado térmico por (HVOF)	Rociado térmico de alambre por arco eléctrico	Rociado térmico por plasma	Rociado térmico por cámara
------------------------	---	--	----------------------------	---	----------------------------	----------------------------



Temperatura de los gases 10 ³ °C (10 ³ °F)						
En todos los recubrimientos	3 (5.4)	3 (5.4)	2 - 3 (3.6 - 5.4)	N/A	12 - 16 (21.6 - 28.8)	10 - 80 (18 - 144)
Fuerza de adherencia MPa (10 ³ psi)						
Metales ferrosos	14 - 28 (2 - 4)	14 - 21 (2 - 3)	48 - 62 (7 - 9)	28 - 41 (4 - 6)	22 - 34 (3 - 5)	100 - 400 (14 - 57)
Metales no ferrosos	7 - 34 (1 - 5)	7 - 34 (1 - 5)	48 - 62 (7 - 9)	14 - 28 (2 - 7)	14 - 28 (2 - 7)	400 - 750 (57 - 107)
Aleaciones autofundentes	---	83+ (12+)	62 (9)**	---	---	---
Cerámicos	---	14 - 32 (2 - 5)	---	---	21 - 41 (3 - 6)	25 - 55 (4 - 8)
Carburos	---	34 - 48 (5 - 7)	83+ (12+)	---	55 - 69 (8 - 10)	500 - 100 (9 - 14)
Density,% of equivalent wrought material ¿?						
Metales ferrosos	85 - 90	85 - 90	95 - 98+	85 - 95	90 - 95	97 - 99+
Metales no ferrosos	85 - 90	85 - 90	95 - 98+	85 - 95	90 - 95	97 - 99+
Aleaciones autofundentes	---	100*	98+**	---	---	---
Cerámicos	---	90 - 95	---	---	90 - 95+	95 - 98
Carburos	---	85 - 90	95 - 98+	---	90 - 95+	95 - 98+
Dureza						
Metales ferrosos	84R _b -35R _c	80R _b -35R _c	90R _b -45R _c	85R _b -40R _c	80R _b -40R _c	30R _c -50+R _c
Metales no ferrosos	95R _h -40R _c	30R _h -20R _c	100R _h -55R _c	40R _h -35R _c	40R _h -50R _c	45R _c -55R _c
Aleaciones autofundentes	---	30 - 60R _c	50 - 60R _c	---	---	---
Cerámicos	---	40 - 65R _c	---	---	45 - 65R _c	50 - 70+R _c
Carburos	---	45 - 55R _c	55 - 72R _c	---	50 - 65R _c	50 - 70+R _c
Permeabilidad						
Metales ferrosos	Alta	Media	Despreciable	Media	Media	Ninguna
Metales no ferrosos	Alta	Media	Despreciable	Media	Media	Ninguna
Aleaciones autofundentes	---	Ninguna	Despreciable*	---	---	---
Cerámicos	---	Media	---	---	Baja-Media	Despreciable
Carburos	---	Media	Despreciable	---	Baja-Media	Despreciable
Limitaciones de espesor del recubrimiento mm (in.)						
Metales ferrosos	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.6 - 2.5 (0.025 - 0.1)	0.5 - 2.5 (0.02 - 0.1)	0.4 - 2.5 (0.015 - 0.1)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.5+)
Metales no ferrosos	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.5 - 2.0 (0.02 - 0.08)	0.6 - 2.5 (0.025 - 0.1)	0.5 - 2.5 (0.02 - 0.1)	0.4 - 2.5 (0.015 - 0.1)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.5+)
Aleaciones autofundentes	---	0.4 - 2.5 (0.02 - 0.2)	0.4 - 3.8 (0.015-0.15)	---	---	0.1 - 15+ (0.004 - 0.6+)
Cerámicos	---	0.4 - 0.8 (0.015 - 0.1)	---	---	(0.4 - 5.0 (0.015 - 0.2)	0.05 - 10+ (0.002-0.25+)
Carburos	---	0.4 - 0.8 (0.015 - 0.1)	0.4 - 5.0+ (0.015-0.2+)	---	(0.4 - 5.0 (0.015 - 0.2)	0.05 - 10+ (0.002 - 0.4+)

* Recubrimiento fundido HVOF

** Recubrimiento no fundido Recubrimientos por cámara, incluye los procesos: VPS, LPPS, LVPS



**TABALA DE ROCIADO PARA LA PISTOLA 5P-II
(MANUAL SULZER METCO)**

POLVOMETCO	Vibrador	Boquilla	Válvula Alimentación Polvo	Válvula Control de Flujo de Polvo	Distancia Rociado (mm)	Presión Gases (Bar)		Flujómetro		Consumo por hora			Velocidad m ³ por hr espesor 0.1 mm	Peso del polvo Kg·m ² Espesor 0.1 mm
						Oxy	Acet	Oxy.	Acet.	Oxy, m ³	Acet, m ³	Polvo Kg		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
12C	NO	P7B-G	11	16-18	230-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	9.1	10.3	.88
14E	NO	P7B-G	11	16-18	230-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	9.1	11.0	.83
15E	NO	P7B-G	11	16-18	230-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	9.1	11.3	.81
15F	SI	P7B-G	11	16-18	130-180	2.4	----	28	----	1.5	----	9.1	11.3	.81
16C	NO	P7B-G	11	16-18	230-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	9.1	11.3	.81
18C	NO	P7B-G	11	16-18	230-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	9.1	10.9	.88
19E	NO	P7B-G	11	16-18	230-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	9.1	11.0	.83
31C	NO	P7B-G	11	10-14	180-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	7.3	7.9	.92
410	SI	P7B-D	12	14-16	75-130	1.4	1.0	32	32	1.5	.85	1.8	3.4	.52

**TIEMPO DE GRANALLADO.**

Para determinar el tiempo de granallado y obtener el mejor anclaje, se procedió a trabajar el sustrato con diferentes tiempos y variando a una mayor distancia para comprobar los valores determinados en la metodología propuesta y se determinó que se siguen manteniendo básicamente los mismos valores, aun realizando a mayor distancia de granallado y a mayor tiempo.

Los parámetros de trabajo experimentados fueron los siguientes:

Sustrato: Solera 1018 de 8 x 5 cm y 1/4 de pulgada de espesor.

Granalla: Óxido de aluminio malla 12

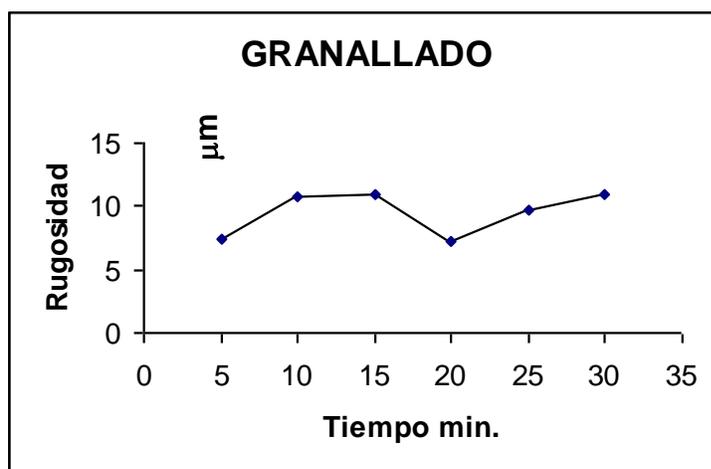
Presión: 80 a 90 lb/in²

Distancia: 30 cm

Se realizaron estudios de rugosidad (ver figuras b1 y b2). para cada uno de los tiempos de granallado, obteniéndose los siguientes resultados.

Tiempo de granallado en minutos.	Rugosidad Ra en μm
5	7.5
10	10.7
15	11
20	7.2
25	9.7
30	11

La siguiente gráfica corresponde a la tabla anterior.





Como se puede observar en la gráfica el tiempo óptimo de granallado es de 15 minutos, para 20 y 25 minutos decrece la rugosidad y para 30 se obtiene el mismo valor que en 15 minutos.

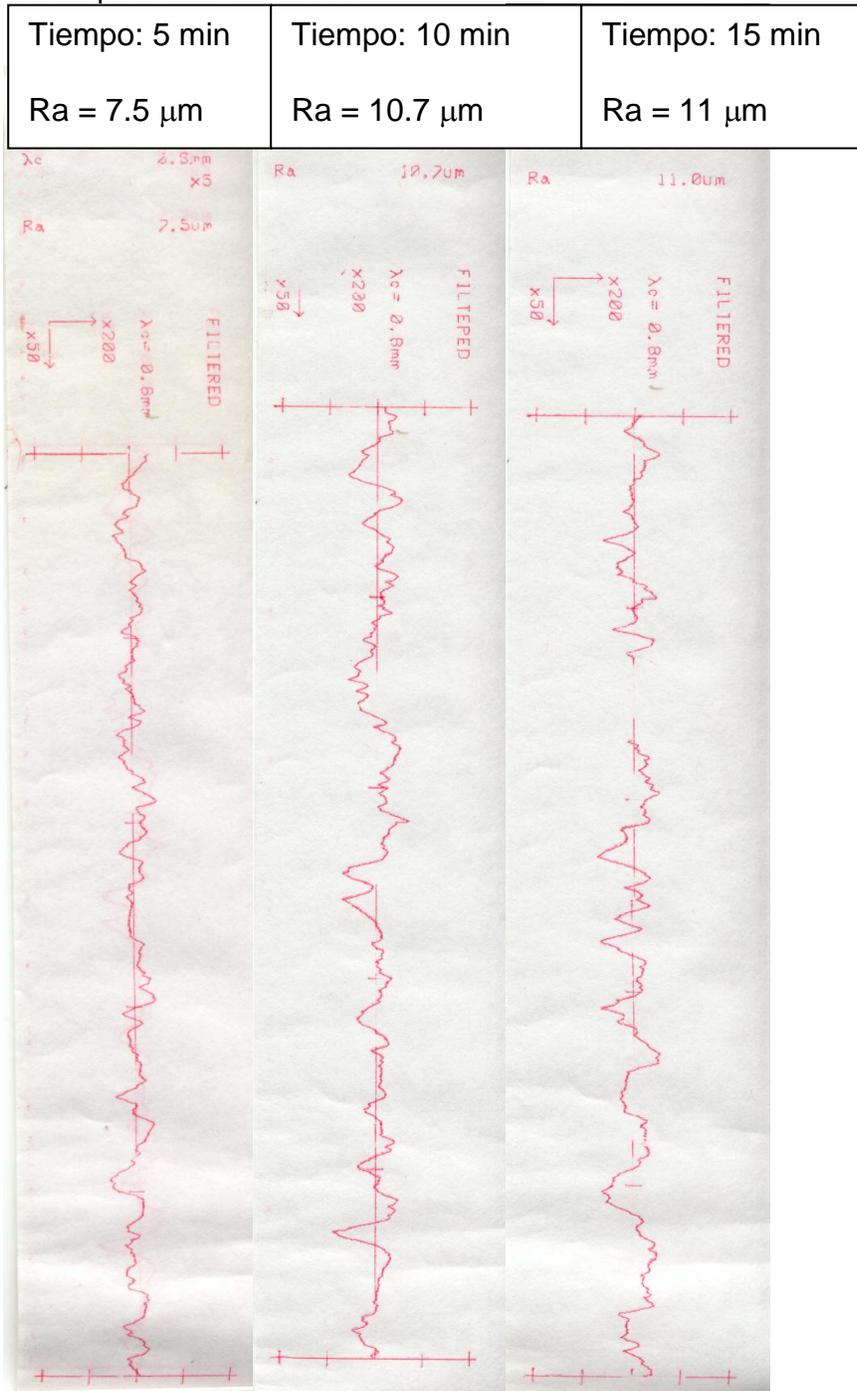


Figura b1. Pruebas de rugosidad para granallado de 5, 10, y 15 minutos.



Tiempo: 20 min	Tiempo: 25 min	Tiempo: 30 min
Ra = 7.2 μm	Ra = 9.7 μm	Ra = 11 μm

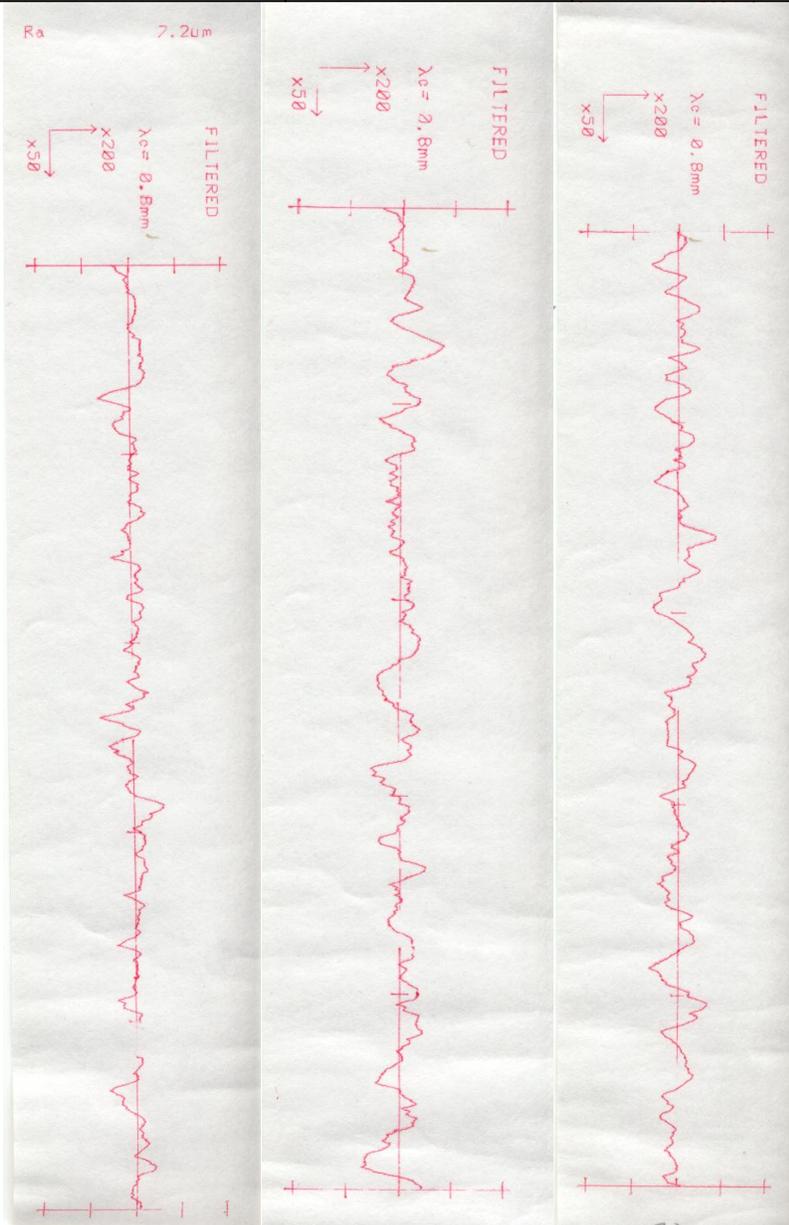


Figura b2. Pruebas de rugosidad para granallado de 20, 25 y 30 minutos.

Como podemos ver en los gráficos la mayor rugosidad conseguida está cerca de los 11 μm , rugosidad que fue obtenida en la experimentación a menor distancia y tiempo.



Apéndice C

Norma para ensayos de desgaste.

METODO DE PRUEBA "PIN-ON-DISK" (Espiga sobre disco)

Este método está basado en la norma G99 de la ASTM y describe el procedimiento a seguir en el laboratorio para determinar el desgaste de materiales por deslizamiento, usando una maquina o equipo pin on disk.

El método puede aplicarse a una gran variedad de materiales. El único requisito es que las probetas tengan dimensiones específicas para que puedan resistir las cargas aplicadas durante el ensayo. Los materiales a ser probados deberán tener una detallada descripción en cuanto a dimensiones, acabado superficial, tipo de material, forma, composición, microestructura, tratamientos térmicos y dureza.

Principio de funcionamiento pin on disk.

Un equipo pin on disk consiste en un posicionador de pin (espiga), el cual es colocado perpendicularmente respecto a un disco; dicho pin de diámetro (d), permanece fijo mientras que el disco gira provocando un deslizamiento relativo en el área de contacto entre ambos elementos, formando una trayectoria circular en la superficie del disco, dicha trayectoria es provocada por la acción de un motor que proporciona la velocidad de giro (w). Como se puede ver en la figura C.1, la probeta en forma de pin se encuentra localizada a un radio (R) del centro del disco, esta probeta se presiona sobre el disco a una carga específica (F), la cual se encuentra usualmente sujeta a un brazo con contrapesos.

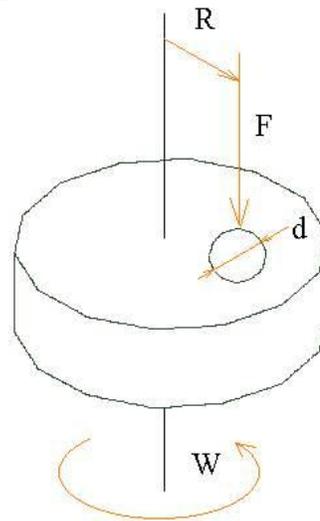


Figura C.1 Distribución del PIN y el DISCO en un proceso de ensayo de desgaste

La probeta "pin" típica es un cilindro o una pequeña esfera, los cuales deben tener un diámetro de 2 a 10 mm. Los discos deberán tener un diámetro entre 30 y 100 mm, con un espesor que varía entre 2 y 10 mm.

El acabado superficial deberá presentar una rugosidad máxima de $0.8 \mu\text{m}$.

6.1.2 Parámetros del ensayo:

Carga: Valores de la fuerza de contacto. (Kg)

Velocidad: La velocidad relativa entre las superficies de deslizamiento. (RPM)

Distancia: La distancia acumulada de deslizamiento. (m)

Temperatura: La temperatura en las dos probetas en cercanía a la superficie de contacto.

Atmósfera: La atmósfera (aire del laboratorio, humedad relativa, etc.) alrededor de la superficie de contacto.

El grado de desgaste de cualquier sistema, dependerá en general del número de factores del sistema como son, las características de la máquina y propiedades del material y cabe destacar que jamás se duplicará un valor en una prueba de pin-on-disk por las condiciones experimentales del ensayo, como por ejemplo, área de contacto, cantidad de partículas removidas y presencia de un ambiente corrosivo.



Procedimiento de la norma G99 ¹:

a) Antes de medir la pérdida de peso en una probeta, lo primero que se tiene que realizar es el lavado y la limpieza de los especímenes. Hay que tener cuidado de limpiar todo tipo de suciedad sobre la superficie; para ello, se deben utilizar solventes que no formen películas y que no sean a base de cloro.

b) Se deberá insertar el disco en el dispositivo de sujeción de transmisión, de tal manera que el disco se encuentre perpendicular al eje de rotación (+/- 1 grado de desviación).

c) Insertar la probeta o pin en su dispositivo de sujeción, de tal manera que quede perpendicular al disco (+/- 1 grado de desviación), con el propósito de mantener las condiciones de contacto necesarias.

d) Aplicar la carga apropiada al pin, de acuerdo a las condiciones de desgaste que se quieren medir.

e) Encender el motor y ajustar la velocidad hasta el valor deseado.

f) Ajustar el contador de revoluciones con el valor deseado. Inicie el ensayo con las probetas en contacto sometidas a carga. La prueba se detendrá cuando se haya completado el número de revoluciones programadas. La prueba no deberá ser reiniciada o interrumpida.

g) Extraer las probetas y limpiarlas de cualquier partícula presente. Observar la presencia de protuberancias, desplazamientos de metal, decoloración, microfracturas o anomalías superficiales.

h) Se deberá medir nuevamente las probetas en cuanto a dimensiones y peso. Esta prueba se debe repetir varias veces con el propósito de tener suficientes datos que estadísticamente produzcan resultados significativos.

i) Las mediciones de desgaste deberán ser reportadas como pérdida de volumen, es decir la cantidad de desgaste mediante la medición apropiada del peso de las probetas antes y después del ensayo. La pérdida de masa por desgaste se puede convertir en pérdida de volumen mediante la utilización de adecuados valores de densidad.

¹ G99-90 standard tests method for wear testing with pin on disk, Anual ASTM publicación 2001.



Apéndice D

Artículos publicados Mediante el desarrollo de este trabajo de investigación

CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO Cr-Ni-Fe-Si-B SOBRE ACEROS AL CARBONO, GENERADO MEDIANTE EL PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA AUTOMATIZADO.

Eduardo Garduño, Arturo Barba Pingaron, Javier Cervantes Cabello, Israel Garduño García
Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Departamento de Materiales y Manufactura.
Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510, México
Tel. 56 –22-80-50, Fax 56-22-80-55

abarba@servidor.unam.mx, egarduno@servidor.unam.

Resumen: En este artículo se muestra el desarrollo experimental llevado a cabo para dotar de mejores propiedades superficiales a aceros de bajo contenido de carbono, especialmente lo concerniente a la resistencia al desgaste de estos materiales, mediante la generación de un recubrimiento (**Cr-Ni-Fe-Si-B**) que ha sido depositado por medio de la técnica de rociado térmico.

Se realizaron recubrimientos superficiales de rociado térmico mediante un equipo automatizado de proyección térmica por flama, montado sobre un brazo robot que permitió la variación de parámetros de proyección. Los recubrimientos obtenidos se han evaluado mediante ensayos de microdureza, y a través de técnicas de microscopía electrónica y microanálisis. Así como su caracterización mediante ensayos de desgaste, variando cargas, velocidades y distancias recorridas, para obtener gráficas representativas, por medio de la razón de desgaste y de su pérdida de peso. Los recubrimientos obtenidos mejoraron la resistencia al desgaste sin afectar la microestructura del sustrato.

Abstract: This article contains a description of the experimental development to improve properties of low carbon steel, using an automatic process of combustion thermal spray. The thermal spray gun attached to a robot arm provided the necessary movements to generate adequate coating.

Coatings obtained of **Cr-Ni-Fe-Si-B** were characterized employing microhardness and wear tests and techniques of scanning electron microscopy and microanalysis. These technologies not modify the microstructure and are a valuable alternative to improve wear resistance.

INTRODUCCIÓN.

La proyección térmica forma parte de las técnicas de deposición superficial integrados en lo que se denomina Ingeniería de Superficies y es un grupo de tecnologías empleadas para obtener recubrimientos de diferentes materiales, comúnmente constituidos de materiales metálicos, cerámicos o una combinación de ambos, sobre una gran variedad de sustratos, lo que permite conseguir una sustancial mejora en propiedades tales como resistencia al desgaste y a la corrosión de piezas y componentes.

El proceso consiste en primer lugar en fundir los materiales con los que se desea recubrir, empleando una gran variedad de fuentes de energía. Las más comunes son la combustión generada por mezclas de gases como oxígeno y acetileno, en el interior de una pistola convenientemente diseñada. El material fundido es proyectado hacia la superficie a recubrir usando para ello una corriente de aire (u otros gases) para conseguir que las partículas fundidas viajen y se impacten contra la superficie del sustrato para ir generando así el recubrimiento. [1].

Los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica por flama, suelen ser porosos y de adherencia limitada, lo que resulta en un revestimiento insuficiente para diversas aplicaciones.

Es por ello que en este trabajo, con el apoyo de la automatización del proceso, se busca mejorar los parámetros de operación, para obtener recubrimientos con menos porosidad y con espesores más uniformes que los conseguidos por métodos manuales.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los elementos utilizados para la generación del recubrimiento superficial, mediante un sistema de proyección térmica por flama automatizado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se detallan a continuación.

En una primera etapa, se utilizó un equipo de proyección térmica convencional que se muestra en la Figura 1, de la marca Sulzer Metco, así como un brazo robot de la marca Motoman modelo K6, estos equipos y diferentes elementos mecánicos y electrónicos se integraron para formar el sistema automatizado (Figura 2).

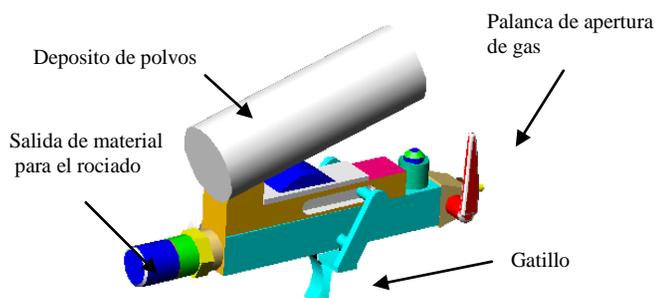


Figura 1. Pistola rociadora modelo SPII de marca SULZER METCO

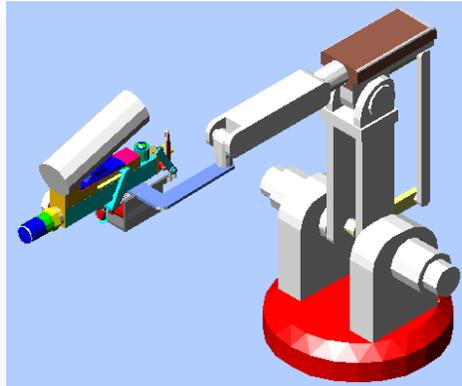
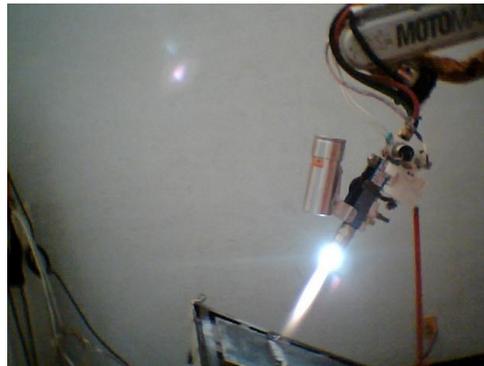


Figura 2. Brazo mecánico con los elementos de automatización de la pistola de proyección térmica

Posteriormente se realizaron pruebas de proyección con el equipo automatizado para la caracterización de la huella de proyección que permitiera obtener posteriormente el recubrimiento más homogéneo posible (Figuras 3).



Figuras 3. Proyección Térmica para la obtención del patrón de rociado

HUELLAS DE PROYECCIÓN.

Se tomaron diferentes huellas de proyección variando la distancia y la calibración de la válvula de control de flujo del polvo, con la finalidad de determinar el paso y la distancia más convenientes para el rociado térmico, las cuales se muestran en la tabla 1.



CALIBRACIÓN DE LA VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO.	DISTANCIA DE PROYECCIÓN		
	20 cm	25 cm	30 cm
16			
17			
18			

Tabla 1 Huellas de Proyección

Se compararon las diferentes huellas (tabla 1) y se seleccionó la correspondiente a una distancia de 25 cm y una calibración de la válvula de control de flujo de 17 [15], por tener una forma y espesor uniforme. Se tomaron medidas de esta huella determinando un paso de la pistola de 1 cm

BANCO DE PRUEBAS

Se realizaron pruebas con el equipo variando velocidades de avance para lograr una rugosidad adecuada para el anclaje de la pieza, obteniendo una rugosidad máxima; para ello se logró obtener una velocidad máxima y homogénea utilizando un rango de velocidades de avance de 100 y 150 cm/min y se hicieron estudios de rugosidad, morfología superficial, espesor de la capa y análisis químico.

Parámetros de trabajo.

- j. Se emplearon muestras de trabajo: Solera 1018 de 5 cm de ancho por 8 cm de largo y espesor de 6.3 mm. Que posteriormente se sometieron:
- k. Granallado de 15 minutos con óxido de aluminio malla 12, obteniendo una rugosidad $R_a = 11 \mu\text{m}$. mediante el uso de una pistola industrial para granallar con un compresor con una capacidad de 11 kg/cm²
- l. El material utilizado en el proyecto fue un polvo metálico: (Ni, Cr 10, B 2.5, Fe 2.5, Si 2.5, C 0.15).

Las condiciones de operación del rociado térmico fueron:

- m. Presión de los gases: Acetileno 0.5 Bar, Oxígeno 2 Bar
- n. Presión del aire: 2.5 Bar.
- o. Distancia de proyección: 25 cm.
- p. Tiempo de proyección: 3 min.
- q. Velocidad: 100 ó 150 cm/min.
- r. Recorrido vertical de la pistola: 1 cm por paso.

Se realizaron diferentes rociados en aceros de bajo carbono con los parámetros obtenidos en la calibración de la huella de rociado, obteniendo así el patrón de rociado y el, tal como se observa en la figura 4.



Figura 4 Recubrimiento obtenido en el proceso de rociado.

Rugosidad.

Se obtuvieron, en a primera etapa mediante un rugosímetro digital marca Mitutoyo se realizó la prueba de deposición obteniendo valores de rugosidad $R_a = 22.5 \mu\text{m}$ para una velocidad de proyección de 100 cm/min, y una $R_a = 17.2 \mu\text{m}$ para una velocidad de 150 cm/min ya que la rugosidad y uniformidad de la capa eran mayores.

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

MORFOLOGÍA SUPERFICIAL.

En la prueba de rociado térmico a una velocidad de 150 cm/min se tomaron micrograffas de la superficie en un microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL20, a distintos aumentos, con el fin de observar la proyección del con el fin de observar la topografía superficial y evidencias de porosidad.

Se puede observar en la figura 5 y 6 las partículas de forma esférica, no adheridas al substrato. En la figura 6 se puede observar la porosidad (zonas negros) y una buena adherencia al substrato de la aleación de recubrimiento fundida.

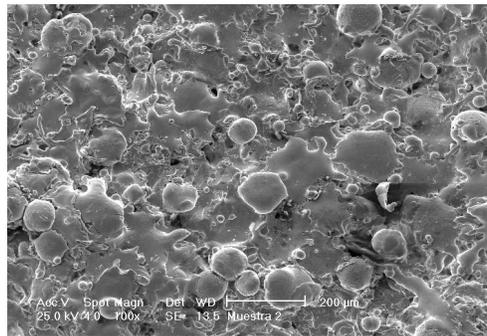


Figura 5 Micrografía de la superficie a 100x

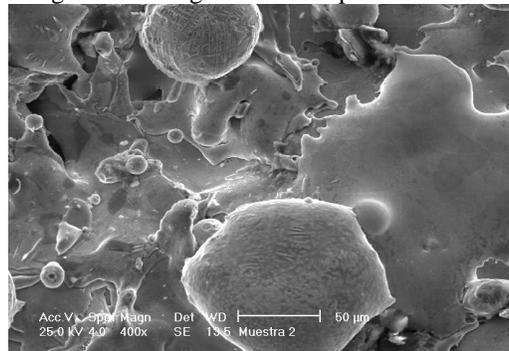


Figura 6 Micrografía de la superficie a 400x

ESPESOR DE LA CAPA.

En la prueba de rociado térmico a una velocidad de 150 cm/min se realizaron mediciones del espesor de la capa en diferentes puntos mediante el método de MEB. Como se puede observar en las figuras 7, el espesor en un punto máximo de la capa es de 1.19 mm.

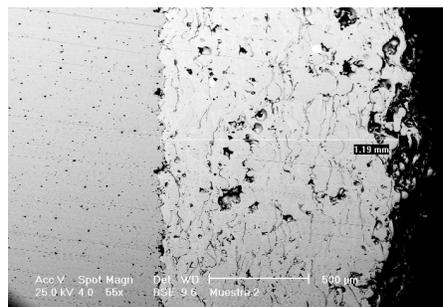


Figura 7 Espesor de 1.19 mm en un punto máximo de la capa

Se realizaron rociados térmicos con diferentes tiempos de proyección, con los mismos parámetros de la prueba anterior para una velocidad de 150 cm/min. Se midió el espesor de la capa, obteniendo los resultados de la tabla 2 y la gráfica correspondiente se muestra en la figura 8.

Espesor de la capa en mm	Tiempo de proyección en seg.
0	0
0.8	60
1.3	120
2.2	180
3.2 (Levantamiento de la capa)	280

Tabla 2 Prueba de rociado de espesor vs tiempo

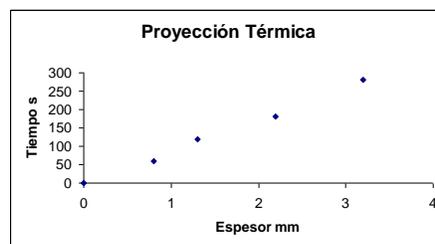


Figura 8 Gráfica espesor-tiempo de rociado

ANÁLISIS QUÍMICO POR MEDIO DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO.

La figura 9 nos muestra el análisis químico del recubrimiento obtenido mediante la microsonda EDAX de las piezas a través de la proyección térmica del proceso automatizado, lo cual permitió obtener datos contundentes sobre la aleación depositada presentando un alto contenido de níquel y cromo.

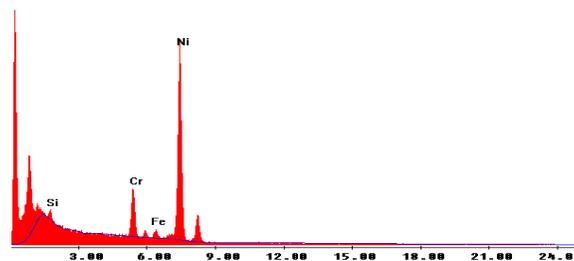


Figura 9 Análisis químico del recubrimiento.

Posteriormente se revisaron probetas para llevar a cabo la caracterización del desgaste de las mismas. Para realizar las pruebas de desgaste se utilizó una máquina para estudios de tribología Cygnus II disc pins Modelo 1985 (Figura 10).



Figura 10 Máquina para estudios de tribología Cignus II

Se eligieron probetas con tiempo de rociado de 1.5 minutos por tener las mejores condiciones de aspecto superficial y rango del espesor de 1.7 mm.

Habiendo elegido las probetas se tuvo que asegurar la misma altura de espiga de las probetas con recubrimiento que se someterían a las pruebas de desgaste. En base a G99- 90 pin o disk, se realizaron las pruebas de desgaste. Para ello se carearon dichas probetas en un torno CNC; con ello se obtuvo un mismo plano de desgaste así como la mayor área posible de contacto de las probetas sobre el disco de desgaste, ya que a la máquina utilizada se le colocan tres probetas por ensayo figura 11 .



Figura 11 Probetas en disco de ensayos

Procedimiento del ensayo.

- 1) Se realizó la limpieza de las probetas “pin” utilizando alcohol para limpiarlas, antes de empezar todos los ensayos.
- 2) Se colocó el disco de desgaste en el dispositivo de sujeción de la transmisión, de tal manera que el disco se encontrara perpendicular al eje de rotación.
- 3) Antes de colocar las probetas “pin” en el dispositivo de sujeción se marcaron y se pesaron en una balanza analítica y se registraron los datos.
- 4) Se montaron tres probetas “pin” en su dispositivo de sujeción, de tal manera que quedará perpendicular al disco con el fin de mantener las condiciones de contacto sobre el disco.
- 5) Se aplican cargas de 150 gr. 300 gr. y 600 gr. en diferentes eventos.
- 6) Se prendió motor con controlador de velocidad y se ajustó primero a 470 RPM con ayuda del tacómetro digital externo para los primeros eventos con 150. 300 y 600 gr. Después se ajustaría a 900 RPM para las mismas cargas.
- 7) Se inició el ensayo con las probetas en contacto sometidas a carga y RPM seleccionados. Se evaluó la duración de los ocho eventos por cada carga con un cronometro externo y con dichos datos se calculó después la distancia recorrida. La prueba se detenía después de completar 3 minutos, por cada evento.
- 8) Se extrajeron las probetas “pin” y se limpiaron de cualquier partícula presente.



9) Se pesaron nuevamente en la balanza analítica registrando nuevamente los datos.

Este procedimiento se repitió desde el punto 4 al 9 en ocho ocasiones por cada una de las tres cargas (150,300 y 900 gr) y a su vez por cada velocidad (470 y 900 RPM). En total se hacían 48 eventos para las tres probetas "pin" con recubrimiento y también sin recubrimiento. Antes de someter el arreglo de probetas a los ensayos de desgaste se midieron espesores de dichas probetas, estas mediciones se efectuaron también después de los ensayos para verificar si existía un cambio significativo en su espesor, estos datos los muestra la tabla 3.

PROBETAS RECUBIERTAS "CAREADAS"			
PROBETA	SUPERFICIE DEL RECUBRIMIENTO	ESPELOR DEL RECUBRIMIENTO ANTES DE ENSAYOS (mm)	ESPELOR DEL RECUBRIMIENTO DESPUES DE ENSAYOS (mm)
1	MUY BUENO	0.30	0.15
2	MUY BUENO	0.30	0.20
3	MUY BUENO	0.30	0.20

Tabla 3 Condiciones de espesores en arreglo de probetas sometidas a desgaste.

Al tener probetas con las mejores condiciones de proyección y misma altura de espiga, se reunieron los parámetros necesarios para tener resultados confiables en los ensayos de desgaste. Los resultados en pérdida de peso y razón de desgaste corresponden a las tres probetas en el arreglo de las pruebas. El tener 3 probetas con las mismas condiciones de prueba o ensayo es de gran utilidad para tener un rango de resultados confiable, es decir para una prueba con las mismas condiciones de velocidad y carga tendremos tres resultados que no necesariamente serán los mismos; así se ubica tanto el valor menor, como el valor mayor para cada prueba.

En la tablas 4 y 5 se presentan rangos de resultados máximos de pérdida de peso a las distancias recorridas para ambos materiales con recubrimiento, así como el del material base sin recubrir AISI 1018.

Carga (gr)	AISI 1018		
	So=230,341 (cm)	So=220,539 (cm)	So=441,079 (cm)
	470 rpm	900 rpm	900 rpm
	Pérdida de peso máximo (gr)		
150	0.0040 - 0.0126	0.0037 - 0.0130	0.0099 - 0.0220
300	0.0258 - 0.0808	0.0030 - 0.0119	0.0076 - 0.0259
600	0.0408 - 0.0948	0.0084 - 0.0103	0.0120 - 0.0300

Tabla 4 Pérdida de peso máximo para probetas sin recubrir.

Los resultados de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento muestran que con carga de 600 gr. y 470 RPM se presentan valores máximos de pérdida de peso a los 230,341 cm. Si comparamos a una distancia



recorrida cercana (220,539 cm) y carga aplicada (600 gr.), pero a 900 RPM resulta que está por debajo de los valores máximos obtenidos a 470 RPM, por lo menos 9 veces menos. Esto se nota con mayor detalle en la gráfica de la figura 12 con las condiciones de prueba en donde se manifestaron las máximas pérdidas de peso comparándolas con la gráfica de la figura 13 en donde cambia únicamente la velocidad a 900 RPM.

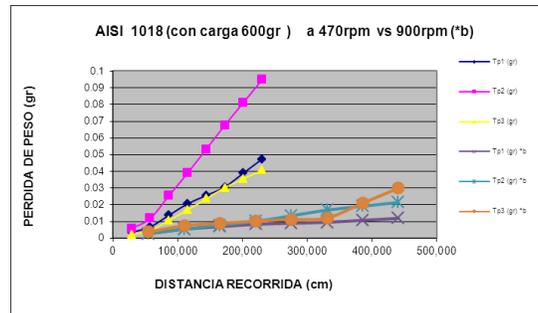


Figura 10.

En la gráfica de la figura 10, se observa la comparación entre tres probetas probadas a 470 rpm, el rango máximo es de 0.0408 gr. Donde para la probeta 3 mientras la probeta 2 es de 0.0948 gr. A los 230,341 (cm) recorridos. Y otras tres probetas probadas a 900rpm en las cuales se observa el comportamiento de las tres probetas, el rango máximo es de 0.0120 gr. para la probeta 3 mientras la probeta 1 es de 0.0300 gr. a los 441,079 cm. recorridos. Cabe destacar que, ni con el doble de distancia recorrida se alcanzan los valores máximos que en las condiciones de 470 RPM, están significativamente por debajo.

PROBETAS RECUBIERTAS			
	<i>So=230,341 (cm)</i> 470 rpm	<i>So=220,539 (cm)</i> 900 rpm	<i>So=441, 079 (cm)</i> 900 rpm
Carga (gr)	Pérdida de peso máximo (gr)		
150	0.0008 - 0.0012	0.0007 - 0.0011	0.0015 - 0.0025
300	0.0004 - 0.0010	0.0004 - 0.0046	0.0012 - 0.0057
600	0.0008 - 0.0012	0.0003 - 0.0005	0.0006 - 0.0026

Tabla 5 Pérdida de peso máximo para probetas con recubrimiento.

Los resultados de pérdida de peso de las probetas con recubrimiento, muestran que con una carga de 300 (gr.) y 900 RPM se presentan valores máximos de pérdida de peso a los 220,539 (cm), si comparamos a una distancia RPM resulta, que está por debajo de los valores máximos recorrida cercana (230,341 (cm)) y carga aplicada (300 (gr.)), pero a 470 obtenidos a 900 RPM, por lo menos 4 veces menor. Lo anterior se puede observar con más detalle en la siguiente gráfica:

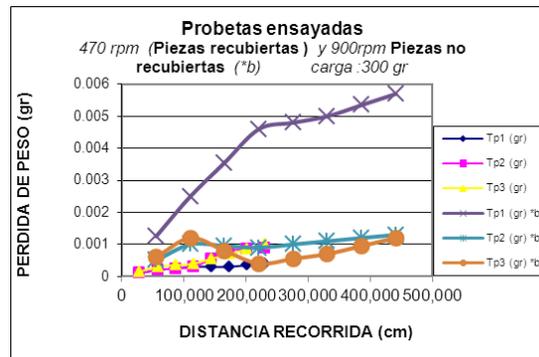


Figura 11

En la gráfica de al figura 11 se observa una comparación entre pruebas a 470rpm y 900 rpm (*b) donde la probeta 1 destaca en la pérdida de peso mientras que las otras ganan peso, de esta forma se tiene que a los 220,539 cm recorridos, el rango de pérdida de peso es de 0.0004 a 0.0046 gr. para el doble de distancia recorrida (441,079 cm.) tenemos que su pérdida de peso es de 0.0012 a 0.0057 cm. Estos datos son los máximos de todas las condiciones de experimentación.

A diferencia de las probetas sin recubrir en donde se obtuvieron las máximas pérdidas de peso a menores revoluciones y mayor carga, las probetas con recubrimiento manifestaron las máximas de pérdida de peso a mayores revoluciones y carga media de 300 gr.

La gráfica de la figura 12 muestran el comportamiento de razón de desgaste para las probetas AISI 1018, en las mismas condiciones que en la pérdida de peso ya mostradas.

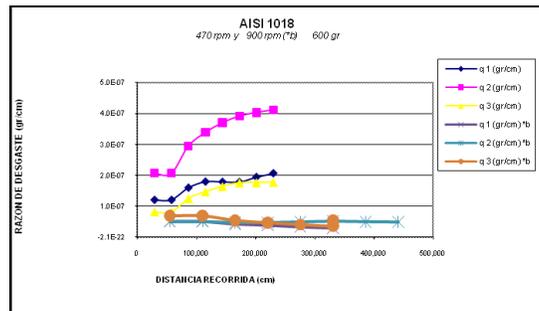


Figura 12 En la gráfica se puede apreciar la tendencia positiva de razón de desgaste de las tres primeras probetas en donde la máxima, es de 1.8×10^{-07} a 4.1×10^{-07} gr. a los 230341 cm. recorridos.

En la gráfica también se puede apreciar la tendencia negativa de razón de desgaste de las tres probetas ultimas probetas (*b) en donde la máxima, es de 5.0×10^{-08} a 6.9×10^{-08} gr. a los 55135 cm. recorridos.

Las gráficas de la figura 13 muestra el comportamiento de razón de desgaste para las probetas recubiertas, en las mismas condiciones que en la pérdida de peso ya mostradas.

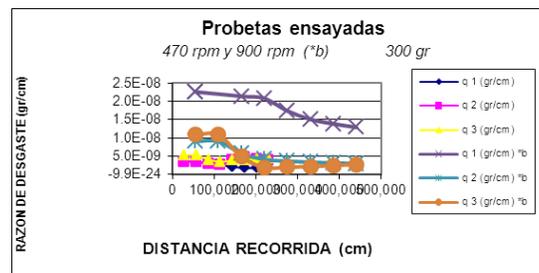


Figura 13

En la gráfica de la figura 13 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 3.5×10^{-09} a 5.2×10^{-09} gr. a los 28,792 cm. recorridos es decir en el primer intervalo de tiempo o lectura.

En la gráfica también se puede apreciar que para las 900rpm la tendencia negativa de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 9.1×10^{-09} a 1.1×10^{-08} gr. a los 55,135 cm. recorridos en el primer intervalo de tiempo o lectura.

Se obtuvieron imágenes de las probetas sometidas a desgaste en un macroscopio de marca Wild Photo macrosk modelo M400 con un rango de resolución de (6.3 – 32) X. para poder observar el tipo de desgaste manifestado en los ensayos como se observa en la figura 19.

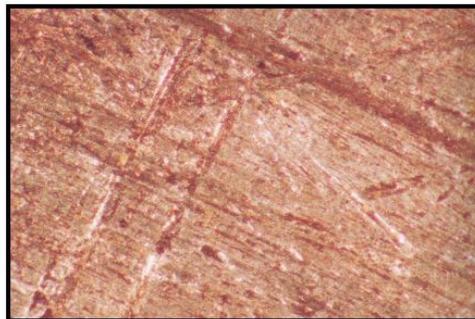


Figura 14 Probeta 3 sin recubrir con desgaste, número de aumentos 32X, en la imagen se observan claramente los surcos característicos del desgaste de tipo adhesivo, con diferentes planos de desgaste.

También se tomaron micrografías en un microscopio electrónico de barrido de la probeta sin desgaste y después de la prueba de desgaste como se puede observar en las figuras 15 y 16.

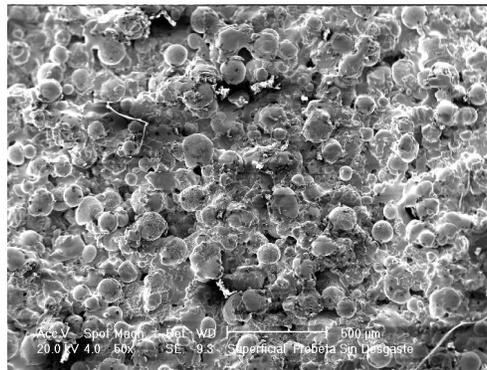


Figura 15 La imagen corresponde a una micrografía superficial tomada por medio de (MEB) (SE) a 20 kV, 50X.

Se puede apreciar las microestructura del material y la densidad de los denominados "SPLATS"

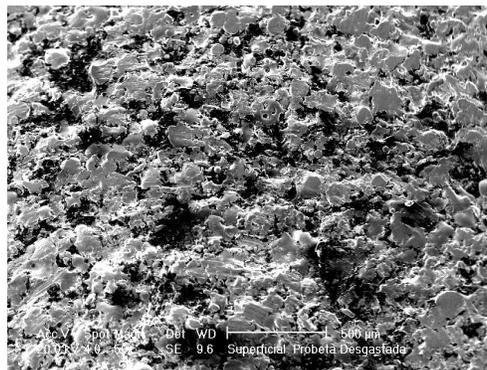


Figura 16 Probeta 3 con recubrimiento tiempo de rociado =1.5 min. Careada y sometida a desgaste, número de aumentos 50X, utilizando detector de electrones secundarios (SE)
En la imagen se observan las huellas del desgaste.

CONCLUSIONES.

De acuerdo al desarrollo del trabajo planteado se tienen las siguientes conclusiones:

Gracias a la automatización del proceso de proyección térmica se pudieron controlar significativamente los parámetros de rociado dando mejores condiciones de homogeneidad de los recubrimientos y control de espesor más constante comparados con el proceso manual.

El tiempo óptimo de rociado térmico automatizado obtenido donde el recubrimiento es más estable es de 1.5 minutos con un espesor de 1.3 mm. Ya que en este tiempo se presentan las mejores características de homogeneidad y espesor más uniforme del recubrimiento. No se debe exceder de 3 minutos puesto que el recubrimiento será defectuoso y se desprenderá.



El recubrimiento redujo el desgaste del material base (AISI 1018) en por lo menos 70 veces en condiciones máximas experimentales (470 rpm y 600 gr.), la mayor resistencia al desgaste en el recubrimiento se debe, a las propiedades mecánicas del mismo, comenzando por su dureza (29 HRC), resistencia a mecanismos de desgaste, tales como el adhesivo, por fatiga y principalmente el abrasivo.

Podemos destacar que para los parámetros establecidos de experimentación, las condiciones críticas de desgaste del recubrimiento en estudio son a mayor velocidad y carga media (900 RPM y 300 gr.).

Los mecanismos de desgaste que dan lugar a los distintos tipos de desgaste, se presentan de manera conjunta y no aislada. Aunque es difícil reconocer el tipo de desgaste, se puede concluir por el tipo de huellas dejadas en las probetas y la pérdida o aumento de masa durante el deslizamiento es de tipo abrasivo.

Los valores obtenidos en estas pruebas de desgaste son aproximaciones relativas para las condiciones establecidas en la experimentación. Puesto que en el método PIN ON DISK, jamás se podrán duplicar las condiciones reales ni siquiera entre dos ensayos que teóricamente sean iguales.

Pero son muy significativos para condiciones de trabajo similares entre este tipo de pares de desgaste aunque para un verdadero acercamiento a estas condiciones mencionadas deberán tomarse en cuenta otras condiciones, tales como la temperatura ambiente, temperatura de trabajo del elemento mecánico, ambiente corrosivo, vibraciones mecánicas, cargas, velocidades de trabajo, condiciones de lubricación, etc.

AGRADECIMIENTOS:

A la DGAPA por su apoyo mediante los proyectos.

PAPIIT IN102606

“Diseño y fabricación de una sierra y taladro para intervenciones quirúrgicas de rodilla y cadera” y

PAPIME PE103207

“diseño e Integración e un Sistema de Manufactura Flexible Modula con topología malla Conexa”

PAPIIT IN107608

“Desarrollo de tratamientos superficiales, térmicos y químicos para la optimización de materiales”.

REFERENCIAS.

1. Metal clusters in catalysis. Iguczi and H Knozinger. Ed. BC Gates. 1935
2. Introducción a la metalurgia física. II edición. Sydney H. Avnner. 1979 Mc Graw Hill.
3. La tecnología en el trabajo de los metales. Richard L. Little. 1980 Mc Graw Hill.
4. J.R Davis & Associates. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004
5. Lech Pawloski. The science and engeering of thermal spray coatings. British Library Cataloguing. England,1995
6. Groover, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall 1a Edición, México, 1997.
7. William D. Calliester Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Reverté, 5a reimpresión, Bracelona 2001



8. Donald R. Askeland. La ciencia e ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1987
9. Francisco Martínez Pérez. La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento. Editorial Limusa, México, 1996.
10. Sangines Franchini Maria. Desgaste de Metales. Editorial Limusa, México, 1990
11. T.S Eyre. Treasures on materials science and technology VOL 13 . Academic press Inc. Brunell University, England
12. Budinski, J.G "Needs and applications measurement and monitoring of wear" Journal of testing and evaluation", JTVA, VOL 25, No.2 March 1997.
13. G99- 90 standar tests method for wear testing with pin o disk , Anual ASTM publication_2001
14. M.P Andres. "Desgaste mecánico : aspectos metalúrgicos y modo de acción en engranes y piezas de automovil" Revista Metal CENIM VOL 17, 1981
15. Sulzer metco Type 5P-II Thermospray Gun "Instructions" 1995.
16. Sulzer metco 12C "Specifics" 1995.
17. Garduño Eduardo, Tesis "Estudio comparativo de niquelado químico, niquelado químico compuesto con adición de partículas duras de óxidos de cromo y fullerenos"
- 18 <http://www.gordonengland.co.uk>
19. [http://www. disagroup.com](http://www.disagroup.com)
20. <http://www.sciencedirect.com/engineering> tribology/Publication.
21. http://www.tesisenxarxa.net/tesis_ub/available/0517107-h0032//00mgb_previo.pdf.

**XII Congreso Internacional Anual de la SOMIM y
Congreso Internacional de Metal Mecánica 2007.**

**DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES
PARA FUNDICIONES NODULARES AUSTEMPERIZADAS.**

Mónica Martínez¹, Rodrigo Torres¹, Arturo Barba², Ana Bolarín³, Félix Sánchez³, Alejandro García⁴, Eduardo Garduño², Magdalena Trujillo², Jesús Roviroza², Javier Cervantes², Pedro Molera⁵

- 1.- Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales. UNAM.
- 2.- Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Departamento de Ingeniería Mecánica. División de Ingeniería Mecánica e Industrial. Facultad de Ingeniería. UNAM. Edificio de Posgrado "Bernardo Quintana Arriola". 2º Nivel. Circuito Exterior. s/n. Ciudad Universitaria. Coyoacan, D.F. México 04510, D.F.
rodrigtortres@gmail.com, arbapin5@gmail.com.
- 3.- Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- 4.- Departamento de Metalurgia. Facultad de Química. UNAM.
- 5.- Departamento de Metalurgia. Universidad de Barcelona, España.

**RESUMEN**

Se presentan los resultados de un trabajo conjunto de estas instituciones, dirigido a dotar de mejores propiedades superficiales a fundiciones nodulares austemperizadas, a través del desarrollo de procesos de Ingeniería de Superficies. En concreto, en este trabajo se detallan los resultados del desarrollo de un proceso de niquelado químico y de otro proceso de proyección térmica para revestir con zinc estas aleaciones. La particularidad de este trabajo es cubrir esta necesidad de mejorar, especialmente la resistencia a la corrosión de estos materiales, sin afectar la microestructura proveniente del proceso de austemperizado que dota a estas aleaciones de muy atractivas propiedades mecánicas. Se elaboraron fundiciones nodulares de alto Cu que han sido austemperizadas y los recubrimientos obtenidos se han evaluado mediante ensayos de microdureza, corrosión y a través de técnicas de microscopía electrónica y microanálisis. Los recubrimientos obtenidos mejoran la resistencia a la corrosión sin afectar la microestructura del sustrato.

ABSTRACT

This work shows results of the development of the application of surface engineering techniques to improve corrosion resistance of austempered ductile iron (ADI). Pieces of high copper nodular iron were heat treated using an austempered treatment obtaining ADI. After these alloys were coated using electroless nickel and flame thermal spray technologies. Coatings obtained of Ni-P and Zn were characterized employing microhardness and corrosion tests and techniques of scanning electron microscopy and microanalysis. These technologies not modify the microstructure and are a valuable alternative to improve corrosion resistance of ADI.

INTRODUCCION

Las fundiciones nodulares (también conocidas como dúctiles) constituyen el grupo de fundiciones más utilizado en la actualidad, industrialmente hablando, en virtud de su capacidad de producir piezas fundidas de calidad apropiada para un amplio grupo de aplicaciones de la industria, entre otras la automotriz. Las propiedades que presentan están asociadas a la presencia del grafito en forma de nódulos lo que permite mejorar las restricciones de ductilidad y tenacidad que presentan otra clase de fundiciones tales como las blancas o las grises.

En el campo concreto de las fundiciones nodulares algunas variantes que permiten ampliar la gama de propiedades son, la incorporación de elementos aleantes, como el níquel con el que se han logrado mejoras importantes pero a un costo relativamente alto o el cobre, que sin embargo se puede agregar en cantidades limitadas para no afectar propiedades importantes.

Un desarrollo de más reciente aparición es la aplicación de tratamientos de austemperizado con los cuales, luego de aplicar una etapa de austenitizado que permita obtener austenita de alto carbono, se enfría el material hasta llegar a una temperatura del orden de 250 a 400°C y luego de una permanencia en este rango de temperaturas se puede obtener una



combinación de fases de propiedades mejoradas en modo importante, respecto a las fundiciones nodulares convencionales. Ello ha permitido generar materiales que están compitiendo, en diversos lugares del mundo, con algunos aceros aleados de mayor costo y una densidad ligeramente mayor. El éxito, por supuesto de estos desarrollos está asociado con un adecuado control de las transformaciones de fase que se producen al aplicar estos ciclos de calentamiento y enfriamiento. En este momento aún se llevan a cabo un importante número de investigaciones dirigidas a intentar explicar el comportamiento de este grupo de materiales en relación con su microestructura y también trabajos de caracterización de su desempeño ante diversas condiciones.

Una de las áreas de la que existe muy escasa información es la relativa a su resistencia a la corrosión en diferentes medios. La referencia inicial respecto a ello es el comportamiento de las fundiciones nodulares convencionales que han mostrado una resistencia a la corrosión limitada. En este sentido y en el interés de mejorar ese aspecto de las fundiciones nodulares austemperizadas, este trabajo se ha dirigido a desarrollar tecnologías de procesamiento que permitan incrementar la resistencia a la corrosión de estas nuevas aleaciones, generando procedimientos que no afecten la microestructura de estas aleaciones, que es la responsable de sus atractivas propiedades.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La aleación se preparó fundiendo chatarra ferrosa, ferro manganeso, cobre, noduloy R6 e inoculante. Una vez obtenida la fundición se efectuó un análisis químico de la misma y un estudio metalográfico y de nodularidad basado en las normas ASTM E 3 – 95 y ASTM A247– 67. Se realizó el estudio anterior tanto a la primera como a la última barra colada con el fin de tener una medida de la homogeneidad de la fundición.

El material fue luego sometido a un tratamiento térmico de recocido con el fin de aumentar el porcentaje de ferrita en la fundición nodular. El tratamiento térmico de recocido se llevo a cabo a 950° C por una hora, con posterior enfriamiento al aire.

Caracterización de la fundición nodular. .

La caracterización microestructural del grafito se basó en la norma ASTM A247– 67. Esta norma clasifica la microestructura del grafito de acuerdo a su tipo, distribución y tamaño.

Preparación de la muestras.

Las muestras se tomaron directamente de la fundición. Se cortaron dos muestras cilíndricas de 25 mm de diámetro y 15 mm de altura. Posteriormente, éstas fueron preparadas para metalografía siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM E 3 – 95 poniendo especial atención en no modificar los nódulos de grafito.

Corte y preparación de las muestras.

Las muestras fueron cortadas con disco abrasivo con el fin de asegurar una superficie plana. Las muestras fueron desbastadas a mano utilizando la siguiente secuencia de papeles abrasivos: 240, 320, 400 y 600. A continuación, las muestras fueron pulidas en una máquina MetaServ utilizando alúmina de 0.5 micrómetros.

Procedimiento.



La caracterización del grafito se realizó sin ataque químico y tomando tres distintos puntos a lo largo del diámetro de las probetas. Las imágenes fueron tomadas con ayuda de un sistema de adquisición de imágenes y el software Image Pro Plus.

Evaluación de la forma.

La evaluación de la forma se realiza mediante comparación entre una imagen de microscopia óptica de la probeta a una magnificación de 100x y las tablas de referencia publicadas por la ASTM.

Evaluación de la distribución.

Al igual que la evaluación de la forma, ésta se realiza mediante comparación de la muestra y tablas de referencia.

Evaluación del tamaño.

Los nódulos fueron medidos directamente de las micrográficas utilizando la escala. Los diferentes tamaños fueron reportados en categorías y su cantidad en porcentajes.

Caracterización microestructural.

Preparación de las muestras.

Una vez terminada la evaluación del grafito las muestras fueron atacadas químicamente de acuerdo con la norma ASTM E 407 – 99 con una solución en alcohol etílico de ácido nítrico al 2% en volumen (Nital). La caracterización de la microestructura se realizó mediante comparación visual entre las imágenes obtenidas por microscopia óptica y las imágenes publicadas por The American Foundrymen's Society. Las imágenes fueron obtenidas con el sistema de adquisición de imágenes y el software Image Pro Plus.

Tratamiento térmico de austemperizado.

Se cortaron seis probetas cilíndricas de 25 mm de diámetro y 15 mm de altura las cuales se utilizarían para la posterior caracterización del material y para ser recubiertas por niquelado químico. Además, se maquinaron dos probetas cilíndricas de 6 mm de diámetro y 40 mm de altura las cuales se usarían en la prueba mecánica de desgaste.

Las piezas se llevaron a temperatura de austenitizado en una mufla Sybron Thermolyne 2000. El tratamiento isotérmico se realizó en un baño de sales Lindberg Blue M. Se precalentó la mufla a 1193 K (920° C) por 2 horas para asegurar uniformidad de temperatura en la cámara. Además, el horno con el baño de sales se precalentó a 623 K (350° C) por 3 horas para asegurar la uniformidad de la temperatura del baño. Las piezas se austenitizaron a 1193 K (920° C) por 45 minutos para después ser sumergidas inmediatamente en el baño de sales a 623 K (350° C) por 35 minutos. Finalmente las probetas se dejaron enfriar al aire.

Caracterización de la fundición nodular austemperizada.

Dos de las probetas cilíndricas de 25 mm de diámetro y 15 mm de altura fueron cortadas a través de su diámetro con el fin de evaluar la microestructura en la dirección paralela al corte. Las piezas fueron montadas en baquelita para facilitar su manejo y fueron preparadas para metalografía de acuerdo con la norma ASTM E 3 – 95. Las piezas fueron atacadas químicamente con una solución en alcohol etílico de ácido nítrico al 2% en volumen según recomendaciones de la norma ASTM E 407 – 99.



Las muestras fueron analizadas por microscopia óptica en las siguientes magnificaciones: 50x, 100x, 200x, 500x y 1000x. La caracterización se realizó comparando visualmente las imágenes con algunas de la literatura y fueron obtenidas con un sistema de adquisición de imágenes y el software Image Pro Plus.

Recubrimiento por Niquelado Químico.

Se prepararon muestras de hierro nodular en tres geometrías distintas cada una con un propósito diferente. Se preparó una probeta semicircular de 12.5 mm de radio y 15 mm de espesor para ser utilizada en la caracterización por microscopia electrónica de barrido del recubrimiento obtenido. Se prepararon tres probetas semicirculares de 12.5 mm de radio y 15 mm de espesor para ser utilizadas en el ensayo de corrosión. Finalmente, se preparó una probeta cilíndrica de 6 mm de diámetro y 40 mm de altura para la prueba mecánica de desgaste. Se prepararon muestras de hierro nodular austemperizado (ADI) con las mismas geometrías y en el mismo número que las anteriores de hierro nodular. .

Limpieza de las muestras.

La limpieza de las superficies a ser niqueladas se realizó siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM B 656 – 91.

El procedimiento incluye las etapas siguientes en el orden presentado.

Las muestras recibieron una limpieza preliminar por inmersión en alcohol etílico para eliminar residuos de grasa. Las muestras, a continuación, fueron lijadas con papel abrasivo de grano fino con el fin de eliminar residuos de óxido y otros contaminantes. Las muestras fueron, entonces, sumergidas por dos minutos en HCl al 5% en volumen.

Asimismo, fueron enjuagadas con agua desionizada antes de cada paso del proceso de limpieza y antes del proceso de niquelado químico.

Preparación del baño.

La preparación del baño se realizó en las concentraciones y en los rangos mostrados en la Tabla I.

NiSO ₄ 6H ₂ O g/L	30 – 40
NaH ₂ PO ₂ H ₂ O g/L	20 – 30
C ₃ H ₆ O ₂ al 99% en peso g/L	5
C ₃ H ₆ O ₃ al 85% en peso g/L	-
CH ₃ COONa g/L	30
Pb ppm	1

Tabla I.- Rango de composiciones del baño de niquelado usado.

Los compuestos fueron añadidos en un recipiente a temperatura ambiente, cuidando su completa disolución en agua desionizada mediante agitación continua.

Niquelado de las muestras.

El baño se calentó en baño maría hasta 358 K (85° C) en un recipiente cuya temperatura era regulada con un control encendido / apagado. Las piezas fueron niqueladas por 3 horas. Durante todo el proceso, el baño recibió agitación continua con el fin de favorecer el depósito del recubrimiento.

La temperatura utilizada corresponde a la de máxima velocidad de deposición, cuidando que el baño no sufra descomposición. Ésta mostró una velocidad de deposición de 10 μm / hora, por lo que se eligieron 3 horas de proceso para tener un espesor de recubrimiento adecuado para su caracterización posterior.

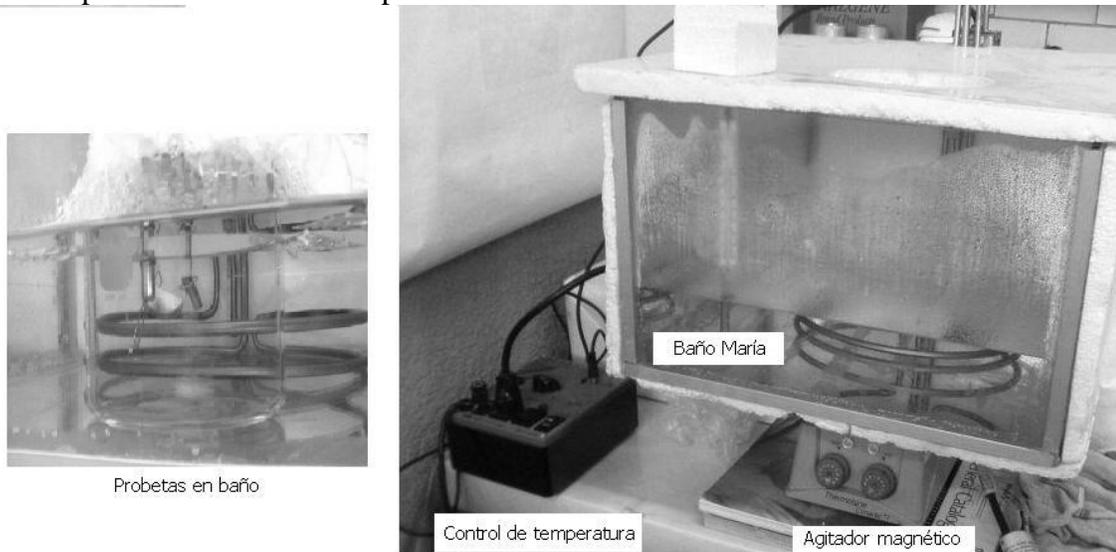


Figura 1.- Equipo utilizado para el niquelado químico de las probetas.

Caracterización del recubrimiento.

La caracterización del recubrimiento fue realizada siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM B 733 -97. Se tomaron dos probetas salidas del baño de níquel, una de hierro nodular y una de hierro nodular austemperizado.

Éstas fueron cortadas con disco de diamante con una máquina Buehler Ltd 10-1000 Cutter. Posteriormente fueron montadas en baquelita y preparadas para metalografía de acuerdo con la norma ASTM E 3 – 95. Las probetas fueron atacadas con nital. Las muestras fueron analizadas con ayuda de un microscopio electrónico de barrido Philips XL-20. Se tomaron imágenes de electrones secundarios y retrodispersados del recubrimiento y el sustrato, además de realizar un análisis químico del recubrimiento mediante un sistema EDS de microsonda.

Ensayo de Microdureza Vickers.

El ensayo de microdureza se realizó únicamente a muestras de hierro nodular y de hierro nodular austemperizado (ADI) recubiertas mediante el proceso de niquelado químico previamente descrito. Se tomaron dos muestras de cada tipo tal y como salieron del baño de níquel. Cabe señalar que las muestras recién recubiertas cumplen con las características



necesarias para la aplicación directa de la prueba de microdureza Vickers (ASTM E 384 - 99). Las pruebas se realizaron en un equipo Shimadzu HMV-2 ASSY.

Una vez preparadas las muestras se fijaron los parámetros de carga y tiempo de penetración tal y como se especifica en la tabla II

Carga [N]	1.961
Tiempo [s]	15

Tabla II .- Parámetros prueba Vickers..

Ensayo de Dureza.

La dureza de las muestras de hierro nodular y hierro nodular austemperizada (ADI) fue tomada siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM E 18 – 98. Las muestras de hierro nodular fueron obtenidas directamente de la colada. De ésta se cortó una muestra obteniendo una pieza cilíndrica de 2.5 cm de diámetro y 2 cm de altura.

Ambas caras de la muestra fueron preparadas para metalografía siguiendo los procedimientos descritos en ASTM E3. Lo anterior con el fin de asegurar una superficie lisa, libre de óxidos y otros contaminantes.

Las muestras de hierro nodular austemperizado (ADI) fueron tomadas de una pieza cilíndrica de 2.5 cm de diámetro y 2 cm de altura sometida al tratamiento térmico de austemperizado descrito previamente. La muestra cilíndrica fue cortada en dos partes a través de su diámetro. El equipo utilizado es una máquina Macromet 3 Rockwell /Superficial Type Hardness TesterBuehler Ltd Modelo 1800-5002 (figura 2.7). De acuerdo con la norma ASTM E 18 – 98 las probetas de hierro nodular y de hierro nodular austemperizado fueron medidas en la escala de dureza Rockwell C. Las pruebas se realizaron en el hierro nodular haciendo cuatro mediciones a lo largo del diámetro de la probeta, mientras en las de hierro nodular austemperizado se tomaron seis mediciones en la dirección paralela al corte. Un total de cuatro probetas fueron sometidas a prueba de dureza.

Prueba Mecánica de Desgaste Adhesivo..

Se maquinaron ocho probetas cilíndricas de 6 mm de diámetro y 20 mm de altura para ser sometidas a prueba de desgaste adhesivo. Cuatro de las muestras fueron maquinadas a partir de hierro nodular y cuatro a partir de hierro nodular austemperizado (ADI). De cada material se tomaron la mitad de las probetas para ser recubiertas por niquelado químico antes de ser sometidas al ensayo.

Las muestras fueron limpiadas en dos etapas. La primera etapa consistió de una limpieza con papel abrasivo de grano fino para eliminar restos de óxido y otros contaminantes. En la segunda etapa las probetas fueron sumergidas en alcohol etílico para eliminar restos de grasa. Finalmente, las muestras fueron perfectamente secadas.

Las muestras fueron pesadas en una balanza analítica calibrada hasta cuatro cifras decimales. El equipo utilizado consiste de un cilindro de acero templado de 6 cm de diámetro y 20 cm de altura y un brazo de sujeción que permite colocar la muestra de manera perpendicular al eje que atraviesa los centros de caras circulares del cilindro. El cilindro gira sobre el eje antes mencionado gracias a un motor de corriente alterna acoplado directamente mediante una junta mecánica. El equipo permite controlar la velocidad de giro variando la corriente administrada al motor.

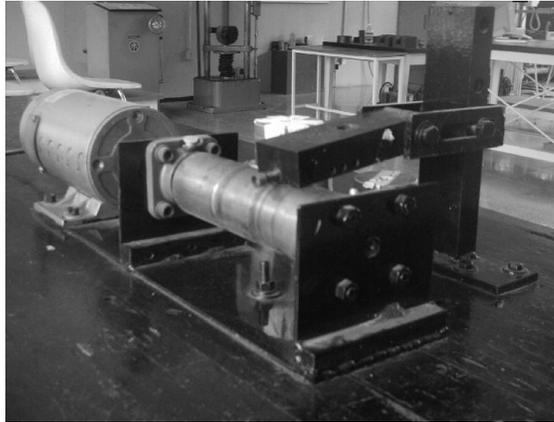


Figura 2. Máquina de desgaste usada..

La prueba se desarrolló siguiendo las condiciones mostradas en la tabla III.

Carga [N]	65.7
Esfuerzo [MPa]	2.3
Velocidad angular [RPM]	400

Tabla III.- Características prueba de desgaste.

Las probetas sin recubrimiento se sometieron al siguiente ciclo de prueba:

- Se tomó el peso inicial con una balanza analítica hasta cuatro cifras decimales.
- Se sometía la probeta a desgaste en la máquina por 20 minutos.
- Se volvía a pesar la probeta y se registraba el cambio de peso.
- La probeta se sometía a otros 20 minutos de desgaste.
- El cambio de peso era registrado nuevamente.
- El ciclo se repitió hasta cumplir 6 horas de prueba por cada probeta.

Las probetas recubiertas fueron sometidas a un ciclo de prueba similar, sin embargo, los intervalos de desgaste fueron variables (entre uno y veinte minutos). El total de la prueba de desgaste de las probetas recubiertas fue de 2 horas.

El proceso de pesar las probetas se realizó en una balanza analítica Satorius BP210-5, cada probeta era pasada tres veces cada ciclo de desgaste, para tomar el promedio de las tres mediciones.

Prueba de corrosión por inmersión.

La prueba se diseñó siguiendo los requerimientos y consejos señalados en las normas:



ASTM G1 – 90 y ASTM G31-72. Se prepararon tres muestras de hierro nodular y tres muestras de hierro nodular austemperizado. Previamente se recubrieron mediante niquelado químico tres muestras de hierro nodular y tres muestras de hierro nodular austemperizado. Las probetas recibieron una limpieza superficial con alcohol etílico con el fin de eliminar residuos de grasa. Posteriormente fueron sumergidas en agua desionizada y bañadas con acetona de grado industrial para eliminar residuos de humedad. Las probetas limpias fueron medidas y su peso fue registrado hasta con aproximación de cuatro cifras decimales. El medio de ataque consistió en una solución en agua desionizada de NaCl al 3% en agua. Las muestras fueron sumergidas en dos litros de la solución preparada como medio corrosivo con el fin de asegurar un nivel de corrosión constante. Las muestras fueron sumergidas cuidando que éstas fueran cubiertas en su totalidad y a la vez quedaran a una distancia del fondo de la mitad del nivel total de líquido. Se tuvo especial atención en que las muestras quedaran lo suficientemente separadas para que no interfirieran unas con otras. La prueba se desarrolló a temperatura ambiente (293 K) y tuvo una duración de 912 horas (38 días).

Una vez transcurridas las 912 horas las probetas fueron sometidas a tres ciclos de limpieza con el fin de eliminar los productos de corrosión. Cada ciclo consistió en la inmersión de las probetas en una solución de HCl por 2 minutos. Posteriormente, las muestras fueron limpiadas con agua desionizada y bañadas con acetona para eliminar residuos de humedad. Finalmente, las muestras fueron cuidadosamente pesadas y su peso fue registrado con cuatro cifras decimales.

Proyección térmica del zinc y caracterización del recubrimiento.

La proyección térmica de zinc se llevó a cabo sobre dos probetas de hierro dúctil y dos probetas de hierro dúctil austemperizado maquinadas. También se proyectaron térmicamente dos probetas de hierro dúctil y dos probetas de hierro dúctil austemperizado con la geometría requerida para la prueba de desgaste. Antes de realizar la proyección térmica del zinc, se revisó que las muestras no presentaran signos de corrosión o presencia de polvo. Después se sometieron a un enjuague de 2 a 4 minutos en una solución de HCl 1.1, que las liberó de grasa, suciedad y óxido. Entonces se procedió a granallar utilizando un compresor y una pistola para proyectar granalla. El granallado se hizo empleando Al_2O_3 de malla 12 por espacio de 5 minutos las probetas de hierro dúctil y 8 minutos las probetas de hierro dúctil austemperizado para poder lograr la rugosidad media necesaria para la adhesión del recubrimiento.

Se utilizó una pistola de gas Sulzer Metco 14E y zinc en forma de alambre con diámetro de 3mm y pureza de 99.99%. La presión de los gases fue 30 psi para el oxígeno, 15 psi para el oxiacetileno y 70 psi para el aire comprimido. La proyección se hizo en dirección perpendicular al área a proyectar y a 15cm de distancia. Al final se llevó a cabo una inspección visual en busca de protuberancias, áreas donde faltara el material, o donde hubiera evidencia de que la capa de recubrimiento no fuera regular. No se encontró ningún defecto visible a simple vista en el recubrimiento. Una probeta de hierro dúctil austemperizado y una de hierro dúctil ambas recubiertas mediante proyección térmica con



zinc fueron cortadas por la mitad obteniendo cuatro nuevas probetas con la capa de zinc y el sustrato expuestos. Haciendo uso del MEB se pudieron obtener los elementos presentes en la capa y en el sustrato. Se obtuvieron imágenes del recubrimiento y el sustrato para analizar visualmente la adhesión del recubrimiento de zinc al sustrato y su espesor de capa. Se tomaron imágenes a 100x, 200x y 240x. Con el propósito de demostrar que el proceso de proyección térmica no modifica al sustrato se tomaron imágenes de la microestructura tanto del sustrato de hierro dúctil como el de hierro dúctil austemperizado, ambas a 1600x. También se llevó a cabo análisis de EDS con microsonda para detectar los elementos presentes en el sustrato y la capa de zinc. Entonces se llevó a cabo el ensayo de microdureza Vickers en un equipo Shimadzu HMV-2 ASSY. Se utilizaron las mismas probetas que se observaron en el MEB pero únicamente se evaluó la capa de zinc. El ensayo siguió la norma ASTM E384-06. La carga aplicada fue de 1.961 N y el tiempo de duración de cada ensayo fue de 15 segundos. Se llevaron a cabo cinco ensayos por cada probeta. Se evaluaron dos probetas proyectadas térmicamente con zinc, una de ellas con sustrato de hierro dúctil y las otras con sustrato de hierro dúctil austemperizado. En ambos ensayos se midieron las dos diagonales hechas por el penetrador. Con estos datos se obtuvieron los resultados de microdureza Vickers.

Material	Número de probetas
Hierro dúctil	2
Hierro dúctil austemperizado	2
Zinc proyectado sobre un sustrato de hierro dúctil.	2
Zinc proyectado sobre un sustrato de hierro dúctil austemperizado	2

Tabla IV.- Material del que están hechas las probetas utilizadas en la prueba de desgaste.

En el caso del hierro dúctil proyectado térmicamente con zinc y el hierro dúctil austemperizado proyectado térmicamente zinc, se observó que el recubrimiento era desgastado muy rápidamente por lo que para obtener datos mas útiles se cambiaron las condiciones del experimento a ciclos de dos minutos a 400 RPM y carga de 65.7 N. Se llevaron a cabo doce ciclos sobre las piezas recubiertas debido a que una vez que el recubrimiento se desgastaba o arrancaba totalmente del sustrato el seguir con la prueba no tenía ya ningún significado para este trabajo. Es importante aclarar que la diferencia en duración de los ciclos no comprometió la relación entre los resultados de las probetas no recubiertas y aquellas que si lo estaban.

Prueba de corrosión.

. Se sometieron doce probetas a esta prueba asegurando un centímetro cúbico mínimo de área expuesta de cada probeta. El material y el número de probetas hechas de él se pueden observar en la tabla V.

Material	Numero de Probetas
Hierro dúctil	3
Hierro dúctil austemperizado	3
Hierro dúctil proyectado térmicamente con zinc.	3
Hierro dúctil austemperizado proyectado térmicamente con zinc.	3

Tabla V.- Material del que están hechas las probetas para la prueba de corrosión

Las probetas se limpiaron con alcohol etílico para eliminar grasa en las superficies, después se enjuagaron con agua destilada y se eliminó la humedad con acetona. Una vez limpias y secas se pesaron en la misma balanza analítica utilizada en la prueba de desgaste. Cada probeta se pesó tres veces. Una vez pesadas se sumergieron en una solución de agua destilada y NaCl al 3% en peso. Inmediatamente después de ser retirada del medio corrosivo, cada probeta fue limpiada para retirar los productos de corrosión. La sustancia de limpieza para las probetas recubiertas con zinc se indica en la tabla VI

Sustancia	cantidad
agua destilada	1000 ml
CrO ₃	50 gr
AgNO ₃	10 gr

Tabla VI. Sustancias empleadas para la limpieza para probetas recubiertas con zinc.

La sustancia se encontraba a 80° C y se limpió cada superficie por un lapso de 15 a 20 segundos. La sustancia de limpieza para las probetas sin recubrimiento fue HCl 1.1(ácido clorhídrico). Las probetas se sumergieron por un período de 10 minutos cada una. Después de cada periodo de limpieza las probetas se enjuagaban con agua destilada, se retiraba la humedad con acetona y finalmente se pesaban en la balanza analítica. Este proceso debía repetirse hasta que la diferencia en peso de cada ciclo comparada con la del ciclo anterior fuera casi cero. En total se llevaron a cabo tres ciclos de limpieza y medición de peso.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

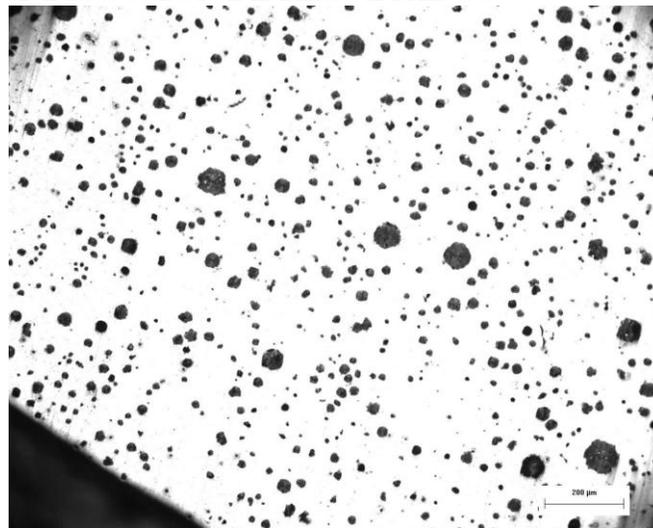


Figura 3.- Nódulos de grafito en la orilla del material. Imagen de microscopia óptica a 100x sin ataque químico.

Se obtuvieron las características de nodularidad del hierro dúctil antes del tratamiento de austemperizado en la orilla. En el centro del material el grafito nodular es más abundante (87 %) debido a que en la orilla la velocidad de enfriamiento por contacto con el molde es mayor haciendo más difícil que la roseta de carbono forme un nódulo compacto y grande (figura 3).

Sin embargo por los resultados observados la diferencia en velocidades de enfriamiento entre la orilla y el centro del material no fue muy grande por lo que se puede decir que las propiedades a lo largo de las probetas eran óptimas y prácticamente homogéneas.

En la figura 4 se pueden observar las laminillas de cementita embebidas en ferrita, lo cual da como resultado un hierro dúctil con una matriz 100% perlítica.

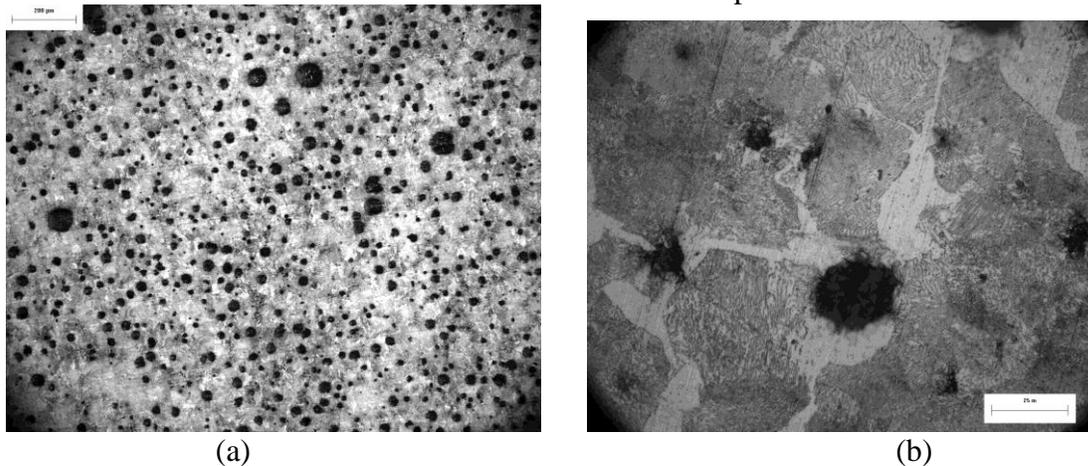


Figura 4 (a) Microestructura perlítica del hierro nodular. Imagen de microscopía óptica a 100x. La probeta fue atacada con una solución de nital al 2%. Figura 4 (b) Microestructura perlítica del hierro nodular. Imagen de microscopía óptica a 1000x. La probeta fue atacada con una solución de nital al 2%. Es evidente la morfología de perlita cerca del nódulo de grafito.

En la figura 5 se observa la microestructura resultante tras llevar a cabo el tratamiento de austemperizado sobre las probetas de hierro dúctil con matriz perlítica. En la figura 5(a) se aprecian los nódulos de grafito. La matriz presenta zonas grises y blancas. Las zonas blancas son austenita alta en carbono mientras que las más oscuras son agujas de ferrita acicular.

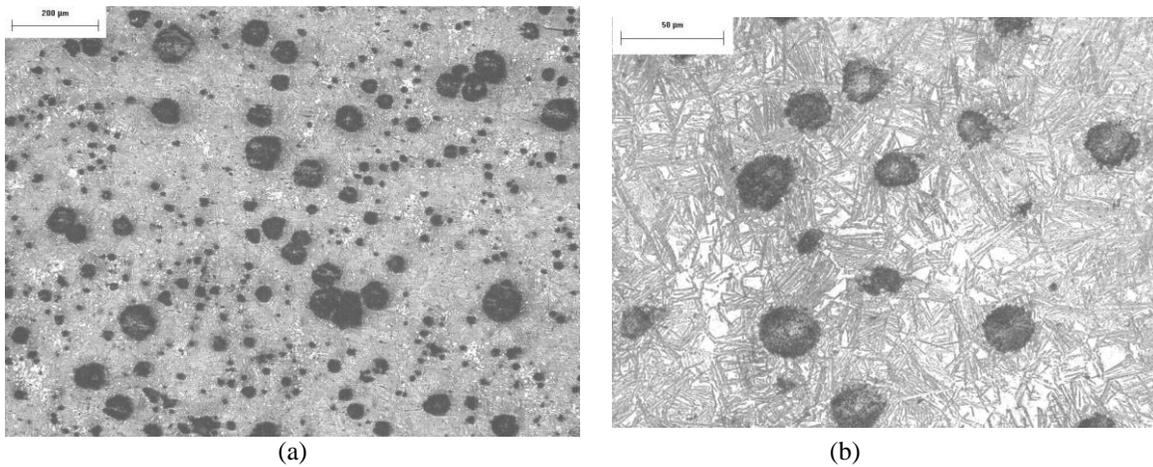


Figura 5.- (a) Ausferrita en un hierro dúctil austemperizado. Imagen de microscopía óptica a 100x. (b) Ausferrita en un hierro dúctil austemperizado. Imagen de microscopía óptica a 500x. Las muestras fueron atacadas con nital al 2%.

Las tablas VIII y IX presentan los resultados provenientes de la medición de la dureza en fundiciones nodulares y las fundiciones nodulares austemperizadas en donde se puede observar que la diferencia en valores es poco relevante.

	Probeta 1	Probeta 2
	Dureza [HRC]	Dureza [HRC]
1	27.5	30.6
2	28.1	29.8
3	29.7	29.5
Promedio	28.4	30.0

	Probeta 1	Probeta 2
	Dureza [HRC]	Dureza [HRC]
1	30.2	29.7
2	32.4	33.3
3	32.1	31.6
Promedio	31.6	31.5

Tabla VIII. Dureza de fundiciones nodulares Tabla IX. Dureza de fundiciones nodulares austemperizadas

Caracterización de la capa de zinc y del sustrato.

En la tabla X se muestran los resultados de la prueba de dureza llevada a cabo en el recubrimiento de una probeta de hierro dúctil con matriz perlítica (1) y un hierro dúctil austemperizado (2). La dureza de la capa es en promedio 25 HV que concuerda con la dureza reportada de 30 Brinell (500 kg) del zinc puro. De acuerdo con la norma ASM E140-97 una dureza de 30 Brinell equivaldría a 33 HV. La ligera diferencia en durezas es comprensible ya que la dureza de 33 HV se toma de una muestra de zinc sólida mientras que la medición de 25 HV se tomó en el recubrimiento que es poroso y laminar.

Tabla X Resultados de la prueba de microdureza llevada a cabo sobre dos probetas recubiertas con zinc proyectado térmicamente. La probeta uno tiene un sustrato de hierro dúctil mientras que la probeta dos tiene un sustrato de hierro dúctil austemperizado.

	Probeta 1	Probeta 2
	Dureza [HV]	Dureza [HV]
1	28.0	27.0
2	24.7	25.5
3	26.6	27.0
4	23.9	24.6
5	17.7	27.5
Promedio	24.18	26.32

Tabla X Resultados de la prueba de microdureza

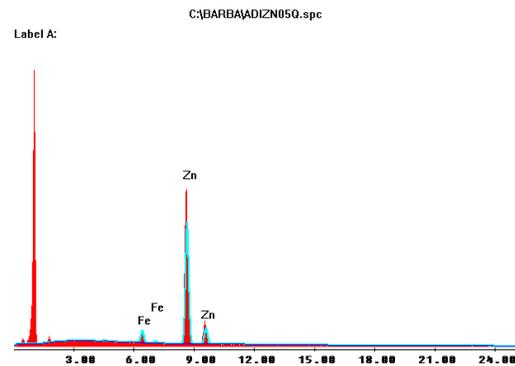
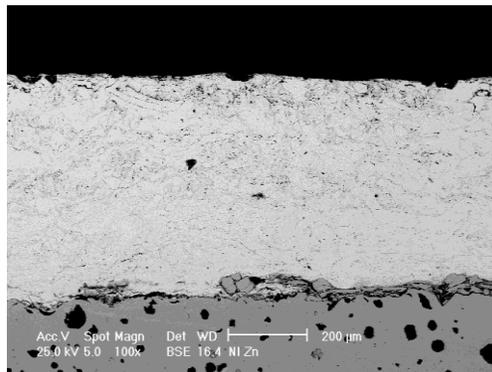
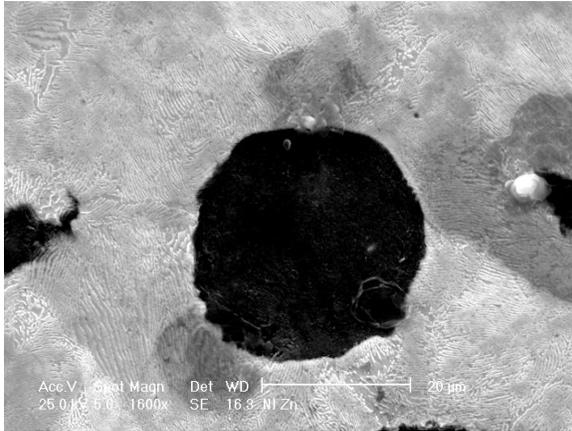


Figura 6.- Elementos presentes en el recubrimiento y el sustrato. Resultados provenientes del análisis con la microsonda.

El espesor de capa de la figura 6 es de 577 μm . El espesor final es determinado por el número de veces que se rocía el sustrato al proyectar. El material representado en la figura 6 fue el que recibió más pases de la pistola de proyección y es una prueba de que el espesor de la capa puede ser muy versátil. En general se recomienda que la capa de recubrimiento sea menor a 500 μm . Los recubrimientos presentados muestran poca adherencia con el sustrato. La baja adherencia del recubrimiento fue un factor nocivo durante la prueba de desgaste.

Las figuras 7 y 8 muestran la microestructura del sustrato de las probetas de hierro dúctil y hierro dúctil austemperizado respectivamente tras la proyección térmica de la capa de zinc.



En la figura 7 se observa una microestructura de perlita y en la figura 8 de ausferrita, lo que demuestra que no hubo cambios en el sustrato debido a la proyección térmica.

Figura 7.- Microestructura de la fundición nodular

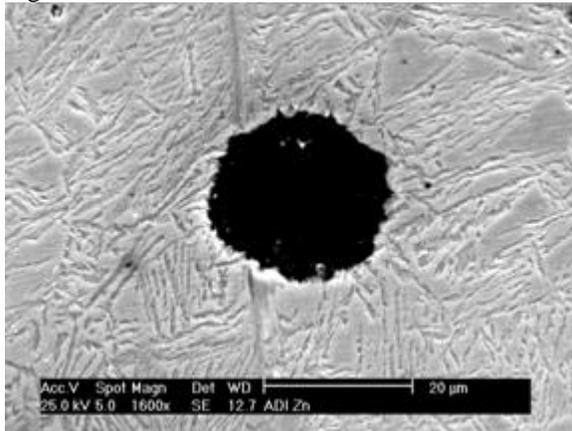


Figura 8.- Microestructura de la fundición nodular luego de haber sido recubierta con Zinc por proyección térmica. La microestructura no cambió.

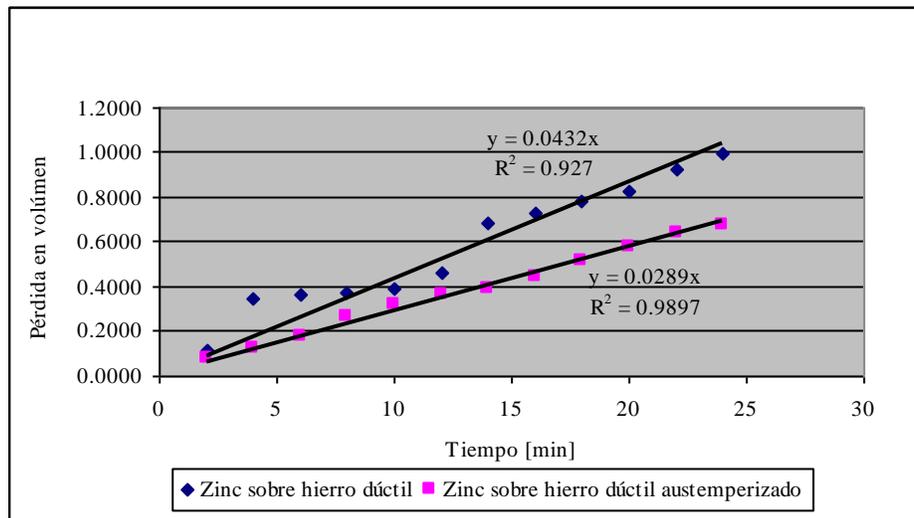


Figura 9.- Pérdida de peso por ciclo de desgaste de las probetas de hierro dúctil y hierro dúctil austemperizado recubiertas con zinc proyectado térmicamente

En la figura 9 se muestran los resultados de la prueba de desgaste llevada a cabo sobre probetas de hierro dúctil y hierro dúctil austemperizado recubiertas con una capa de zinc proyectado térmicamente. En general puede observarse que la pérdida de volumen en las piezas aumentó con el tiempo. La diferencia en tendencias puede deberse a que una microestructura ausferrítica es más tenaz que una perlítica. El desgaste de la capa de zinc fue muy rápido. Como se observa solo tomó 25 minutos de prueba para que el recubrimiento fuera arrancado totalmente de las probetas. Durante el experimento era notorio como pequeñas láminas de recubrimiento eran separadas del sustrato en ambas probetas. Esto explicaría el comportamiento de la probeta de hierro dúctil, cada salto en la gráfica indica que una lámina de recubrimiento fue arrancada. En la gráfica del sustrato de hierro dúctil austemperizado esto no ocurre, no se visualizan saltos tan drásticos aunque durante la prueba si eran visibles láminas de recubrimiento. Esto puede deberse a que la capa de zinc tuvo mejor adherencia en el sustrato de hierro dúctil por lo que laminillas más pequeñas de recubrimiento eran arrancadas y que el sustrato de ausferrita es más resistente en estas condiciones de desgaste por lo que cuando el material quedaba desnudo el desgaste del sustrato era menor.

En cuanto a los resultados de la prueba de corrosión llevada a cabo en una solución de NaCl al 3% en agua destilada se observa que la velocidad de corrosión del hierro dúctil austemperizado es un poco mayor que la del hierro dúctil con matriz perlítica. Información acerca de las velocidades de corrosión de hierro nodular y en particular de hierro nodular austemperizado es escasa, lo que dificulta su comparación. Uno de los pocos datos existentes se menciona en [4], donde la velocidad de corrosión de un hierro dúctil con matriz perlítica sometido a corrosión en una solución de NaCl al 3.5%, a una temperatura de 30° C con agitación es de 740µm/year. Comparada con la velocidad de corrosión

obtenida, la diferencia es enorme pero se debe a que las características de ésta prueba se hicieron a temperatura ambiente, sin agitación y a menor concentración de NaCl.. La pérdida en peso de las probetas recubiertas con una capa de zinc proyectado térmicamente mostraron un comportamiento aparentemente anormal. A diferencia de las probetas no recubiertas, las piezas recubiertas presentaron un incremento en peso por lo que el determinar la velocidad de corrosión fue imposible. Al retirar las probetas de la solución de NaCl se observó un abundante producto de corrosión de color blanco (figura 10), justo encima de la superficie expuesta del recubrimiento de zinc. Tras analizar las superficies de zinc con MEB fue evidente que el incremento en peso se debía a residuos de la sustancia blanca encontrada, atrapados en la superficie rugosa del recubrimiento (figura 11). Los hidróxicloruros de zinc aparecen cuando hay humedad en el recubrimiento, el flujo de oxígeno es limitado y en presencia de iones cloruro. El análisis químico de la figura 11 es consistente con este resultado. A pesar de que los productos de corrosión eran abundantes la capa de zinc no tuvo daño fatal, cumpliendo con el objetivo de proteger al sustrato.

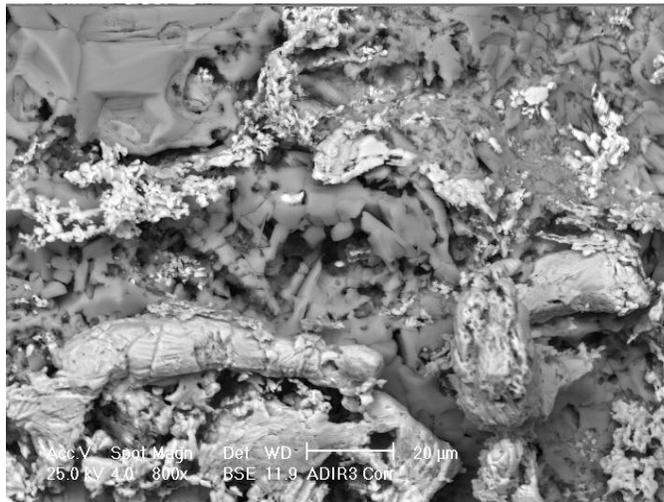


Figura 10.- Imagen de MEB, electrones retrodispersados, de los productos de corrosión de fundición nodular austemperizada recubierta con Zn mediante proyección térmica, luego de ensayo de corrosión en una solución 3% NaCl. 800 X.

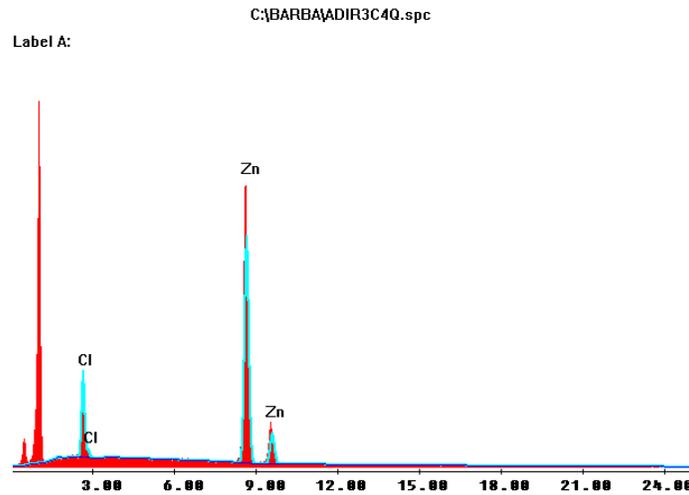


Figura 11.- Resultados del análisis químico mediante microsonda de los productos de corrosión de los recubrimientos de Zn proyectado térmicamente sobre fundición nodular austemperizada luego del ensayo de corrosión en una solución de NaCl, mostrándo la evidencia de la posible formación de compuestos de cloro.

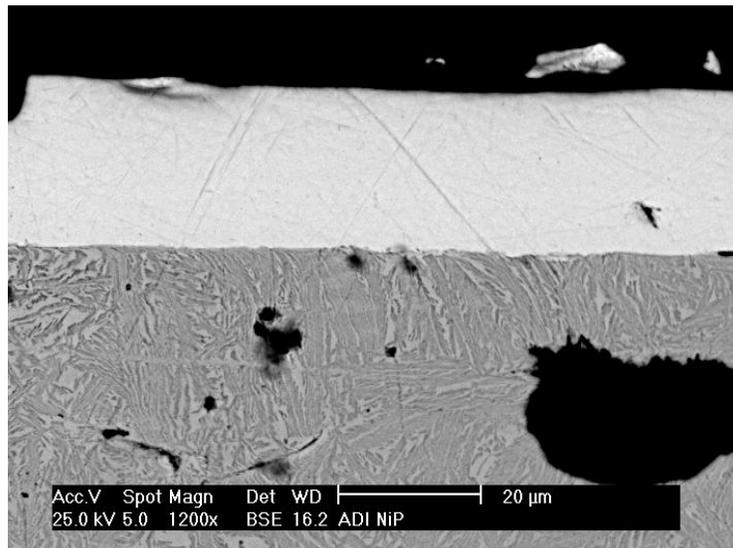


Figura 12.- Hierro nodular austemperizado con recubrimiento Ni – P (atacado con Nital al 2%).

Se observa que el tratamiento termoquímico no afecta la matriz ausferrítica. La microdureza promedio del recubrimiento en las probetas de hierro nodular fue de 627 HV 200 gf con una desviación estándar de 110.

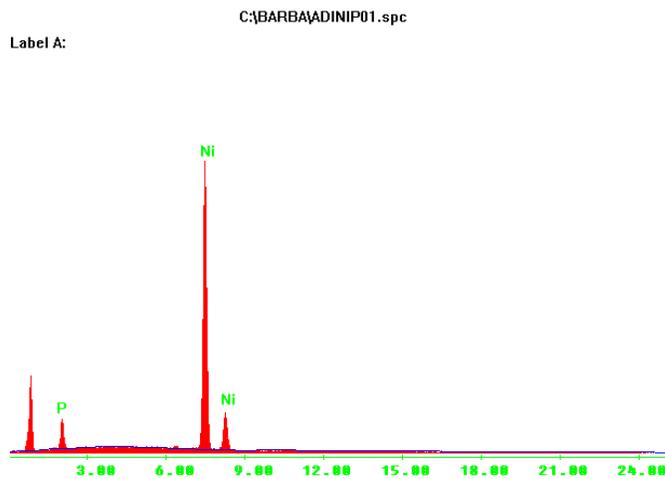


La microdureza promedio del recubrimiento Ni-P en las probetas de hierro nodular austemperizado fue de 757 HV 200 gf con una desviación estándar de 115.

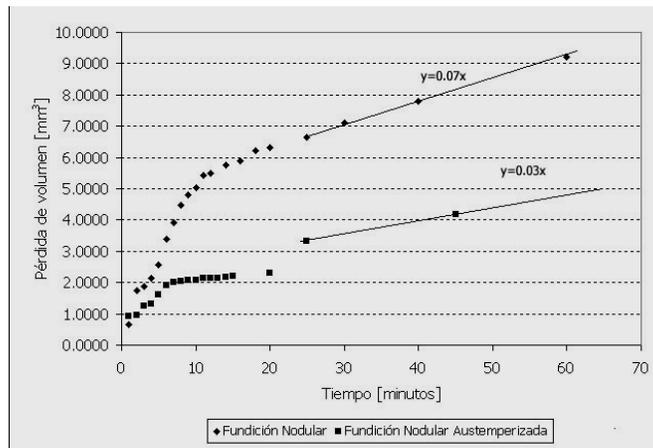
Con ayuda del microscopio electrónico de barrido (SEM) se pudo observar que el espesor del recubrimiento obtenido bajo las condiciones experimentales dadas es en promedio 26 μm .

En general se observa una adherencia buena entre el recubrimiento de níquel fósforo y la matriz. Sin embargo, se pudieron encontrar algunos pocos puntos con problemas.

El porcentaje de fósforo del recubrimiento es de 4.75% en peso tal y como se aprecia a continuación, en el espectro obtenido y los datos que lo acompañan.



Element	Wt %	At %
P K	4.75	8.63
NiK	95.25	91.37
Total	100	100



Desgaste adhesivo de las probetas con recubrimiento Ni - P.

Se observa una clara disminución en la pérdida de volumen al tener un material con microestructura ausferrítica. La pérdida de volumen en función del tiempo disminuye en casi un 70%.

En los primeros 20 minutos la totalidad del recubrimiento se pierde. Después, la prueba sigue el comportamiento de desgaste de la matriz.

La pérdida de volumen del recubrimiento es muy acelerada.

Se observa que el recubrimiento sobre la fundición nodular austemperizada respondió mejor a las condiciones de desgaste adhesivo

		Velocidad de corrosión [µm/año]
Sin recubrimiento Ni - P	Fundición nodular	70
	Fundición nodular austemperizada	71
Con recubrimiento Ni - P	Fundición nodular	35
	Fundición nodular austemperizada	44

Resumen de velocidades de corrosión.



Se observa que la velocidad de corrosión de ambas fundiciones sin recubrimiento es prácticamente la misma. Además, se observa que la velocidad de corrosión disminuye 50% para el caso de la fundición nodular recubierta y 40% para la fundición nodular austemperizada.

CONCLUSIONES

RECONOCIMIENTOS

Dr. Genescá, Carlos Rodríguez, Gabriel Lara, Germán (MEB)

REFERENCIAS

DISEÑO DE ELEMENTOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR FLAMA.

Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Manufactura Avanzada,
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito exterior de Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510, México
Tel. 56-22-80-50, Fax 56-22-80-55

Eduardo Garduño, Arturo Barba P., Luis Antonio Gomez C., Jose Manuel Gonzalez L.

abarba@servidor.unam.mx, egarduno@servidor.unam.mx

Resumen: En este artículo se muestra el diseño para la automatización del proceso de proyección térmica por flama, el cual permitirá la obtención de recubrimientos de diferentes materiales, con cualidades de resistencia al desgaste y a la corrosión. El diseño de los elementos que integran el sistema automatizado fueron validados mediante modelado en CAD y animado en 3D. Para valorar el buen funcionamiento del sistema automatizado se generó un prototipo mediante la técnica de estereolitografía. El prototipo se ensambló integrándose los componentes mecánicos y electrónicos acoplándolos a una pistola de proyección por flama y ésta a su vez se montó en un brazo robot, el cual le proporcionó los movimientos necesarios para poder llevar a cabo el proceso de recubrimiento.

A partir de los resultados se plantean las ventajas que traerá el diseño automatizado.

Abstract: This article contains a description of the design of an automised process of thermal flame projection which produces a coating made up of different alloys resistant to rust and erosion. The design of the elements which integrate the automised system were tested by being modeled in CAD and animated in 3D. In order to test the correct functioning of the automised system a prototype was created using a stereolithographic technique. The prototype was assembled integrating mechanical and electric components connected to a flame projection pistol which was then mounted onto a robotic arm, thus providing it the degree of movement necessary to carry out the thermal coating process.



INTRODUCCIÓN.

La proyección térmica forma parte de las técnicas de deposición superficial integrados en lo que se denomina Ingeniería de Superficies y es una tecnología empleada para obtener recubrimientos de diferentes materiales, comúnmente constituidos de materiales metálicos, cerámicos o una combinación de ambos, sobre una gran variedad de sustratos, lo que permite conseguir una mejora sustancial en propiedades tales como resistencia al desgaste y a la corrosión de piezas y componentes.

El proceso consiste en primer lugar, en fundir los materiales con los que se desea recubrir, empleando una gran variedad de fuentes de energía. Las más comunes son la combustión generada por mezclas de gases como oxígeno y acetileno, en el interior de una pistola convenientemente diseñada. El material fundido es proyectado hacia la superficie a recubrir usando para ello una corriente de aire (u otros gases) para conseguir que las partículas fundidas viajen y se impacten contra la superficie del sustrato para ir generando así el recubrimiento. [1] [2].

Los recubrimientos obtenidos mediante este proceso convencional pueden ser porosos y discontinuos en su espesor, entre otros factores y parámetros que hacen que en muchos casos pueda ser de baja calidad el proceso de proyección por flama.

Es por ello surge la necesidad de automatizar el proceso buscando mejorar los parámetros de operación, para obtener recubrimientos más uniformes.

PROPUESTA DE DISEÑO

A continuación se menciona el diseño propuesto con los elementos necesarios para formar un sistema de proyección térmica por flama automatizado.

El diseño que a continuación se presenta fue realizado con base a la metodología de diseño propuesta por Stuart Pugh [4]. El método comprende las siguientes fases de diseño:

- Necesidad Salida de material
para el rociado
- Especificaciones
- Diseño conceptual
- Diseño de detalle
- Manufactura
- Ventas.

DESARROLLO DEL DISEÑO

Como primera etapa, se tomaron las dimensiones y especificaciones del equipo de proyección térmica convencional tal como se muestra en la Figura 1, así como del brazo robot todo ello para diseñar los elementos que integrarán el sistema automatizado.

Para lograr automatizar el equipo con el cual se realiza el proceso de deposición por flama es importante considerar las características y especificaciones que conlleva el proceso, de las cuales las más importantes son: la apertura de la válvula de los gases de proceso, la activación del proceso de encendido de la pistola rociadora, la activación del gatillo para que el polvo utilizado para el rociado comience a salir del contenedor colocado en la parte superior de la pistola de proyección. Así mismo, los elementos que constituyen el equipo automatizado deben ser de un material ligero para que el brazo robot pueda transportarlo sin dificultad. El robot tiene que cumplir las siguientes especificaciones:

Cargar y trasladar el equipo con un peso promedio de 6 kg. La pistola de proyección sin carga es de 5.5 kg.

El robot tiene como especificación de fábrica que su capacidad de carga es de 6 kg. Por lo tanto el equipo y los elementos a diseñar no deberán de sobrepasar este peso.

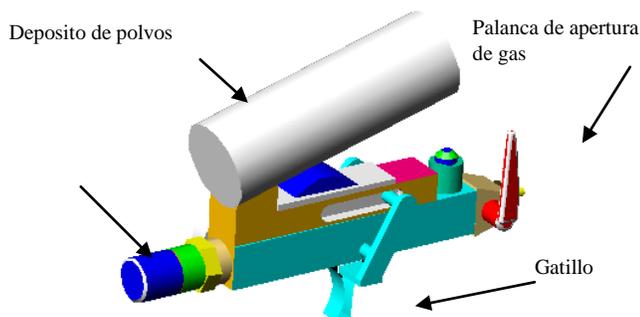


Fig.1 Pistola rociadota modelo 5PII de marca SULZER METCO

En base a estas especificaciones se modeló el equipo en CAD mediante el software Solid Edge, a continuación se describen los elementos diseñados.

REPRESENTACIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE EL MODELADO DE SÓLIDOS

En un primer término se muestra el diseño conceptual para el soporte de la pistola figura 2 que servirá para soportar la carcasa, y como elemento de acoplamiento al brazo mecánico.

Esta pieza es importante debido a que será la que cargara el peso total del equipo, Para asegurar que cumpliera con las características señaladas, además de contar con la resistencia solicitada y minimizar el peso se realizó un análisis por elementos finitos (FEA), mediante la herramienta de Algor.

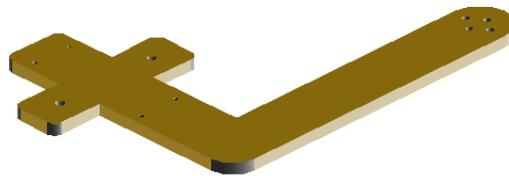


Fig.2 Soporte

Después de llevar a acabo una serie de análisis, se mejoró el diseño conceptual, tal como se muestra en la figura 3. Así mismo sirvió dicho analisis para seleccionar el material y la forma de la pieza final al someterla a la carga especificada.

Se modelo como una viga en cantiliver con un apoyo fijo en la base de acoplamiento en el brazo mecánico y una carga de 6kg en el extremo del elemento.

Para realizar la malla de elementos se consideraron como tipo brick y material aluminio 6061 T6.

Obteniendo los siguientes resultados:

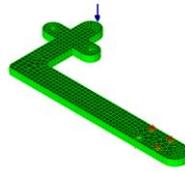


Fig.3 Mallado del soporte y aplicación de condiciones de frontera.

Al realizar el análisis se obtuvo que el esfuerzo principal y los esfuerzos mediante el modelo de Von Mises no rebasan el esfuerzo de cadencia del material propuesto por lo que se hizo esta selección para la fabricación de la pieza.

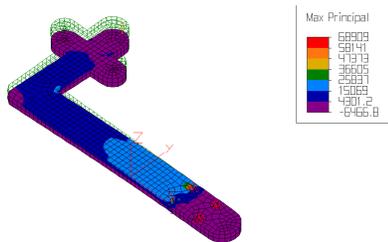


Fig.4 Resultado de esfuerzos máximos en el soporte

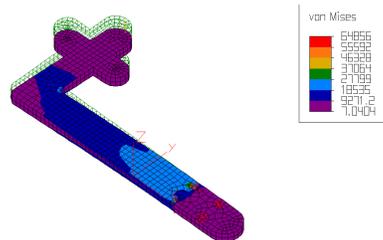


Fig.5 Resultado de esfuerzos mediante Von Mises

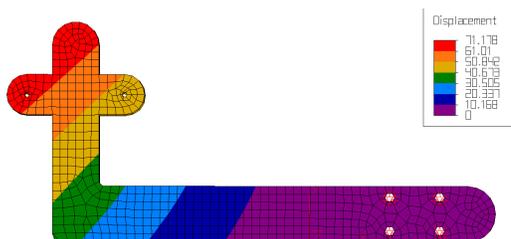


Fig.6 Resultado de desplazamientos de la pieza

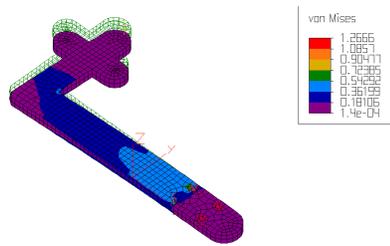


Fig.7 Resultado de deformación de la pieza

En base a estos resultados se llevo a cabo la fabricación de la pieza.

El soporte está constituido por una pieza metálica hecha de aluminio 6061 T6, con un espesor de 10 mm, la cual cuenta con diferentes perforaciones que están destinadas a la sujeción tanto de la carcasa de automatización como también de la misma al brazo mecánico. Dicha pieza fue fabricada en una máquina de control numérico.

Ésta pieza al montarse en el efector final del brazo mecánico y ponerse en funcionamiento se pudo observar que no sufrió ningún tipo de deformación ni vibración, cosa que se temía debido que es la que presenta mayor peso en el sistema, tal como se observa en la figura 8.



Fig. 8. Soporte de la Pistola Rociadora al brazo mecánico

Posteriormente se diseñó el sistema de disparo para el accionamiento del gatillo de la pistola rociadora. Ver figura 9.

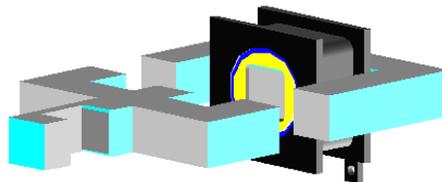


Fig. 9 Sistema de disparo

Es necesaria la utilización de un sistema de soporte para el diseño del accionamiento del gatillo antes mencionado. Para ello se diseño una carcasa para el sistema de soporte. Figura 10.

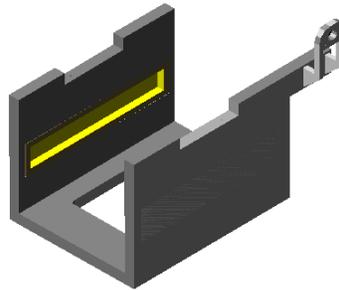


Fig.10 Carcasa

Para accionar la apertura del gas del equipo de proyección se diseñó una pieza llamada brazo accionador. Esta pieza aplica la fuerza necesaria sobre la válvula de apertura del gas, accionada por un motor de CD. Figura 11.

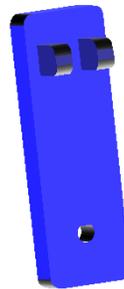


Fig.11 Brazo accionador de la válvula de gas

Para poder accionar el gatillo de disparo del equipo de proyección se diseñó un elemento el cual se sujetó a una de las piezas de la armadura de la bobina que accionará al gatillo. Además se le agregó un tornillo el cual sirve como un ajustador para calibrar la distancia entre el gatillo y el actuador, para con ello poder obtener un mejor resultado a la hora del accionamiento del mismo, así también para no tener poca afluencia de material de proyección dentro del proceso. Figura 12.

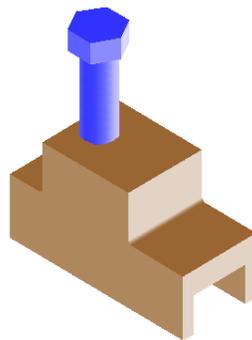


Fig.12 Actuador del Gatillo

Para poder accionar la apertura del gas del equipo de proyección se acopló un soporte junto con un motor de CD y así como de unos interruptores para la apertura máxima y mínima, tal como se observa en las figuras 13 y 14.

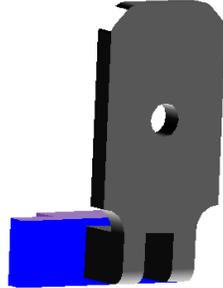


Fig.13 Soporte del motor accionador de la válvula de gas

Todas las piezas de los elementos mencionados fueron fabricadas por el proceso de prototipado rápido generando así un prototipo rápido con las características y especificaciones necesarias para la automatización del proceso.

El material utilizado por la máquina de prototipos rápidos es el polímero ABS, el cual es polímero ligero y funcional estructuralmente hablando.

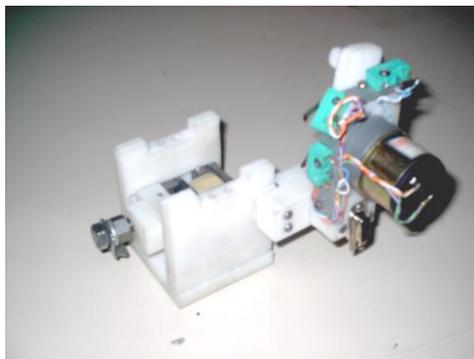


Fig.14 Ensamble completo de la carcasa del sistema de automatización

En la figura 15 se representa el montaje de la pistola de proyección térmica sobre el sistema de soporte y acoplamiento.

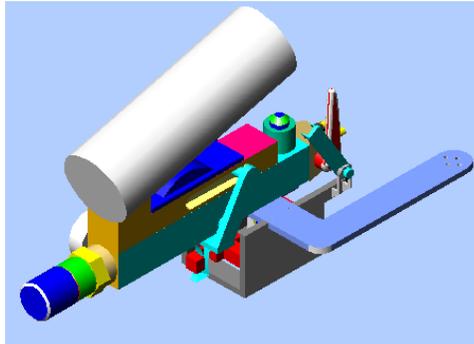


Fig.15 Pistola colocada en el elemento de automatización

A continuación se muestra el diseño terminado, en donde se ilustra la colocación que se requiere del equipo para la automatización en el brazo mecánico para un buen funcionamiento del proceso. El modelo representado es la mejor opción en cuanto a fabricación, costos y sobre todo la principal restricción que se presenta, que es el ahorro de peso en todo el conjunto del equipo. Figura 16.

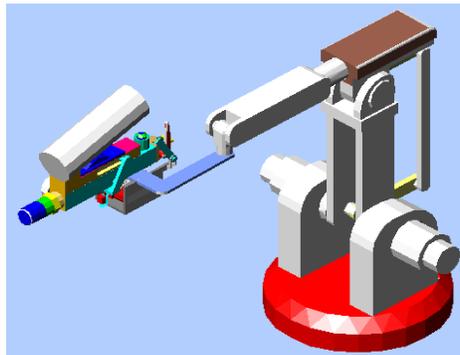


Fig.16 Brazo mecánico con el aditamento de automatización de la pistola de proyección térmica

SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN (ELECTRÓNICA) DEL PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA

Para lograr la automatización del proceso se optó por lo siguiente:

- Para la apertura de la válvula se utilizó un motorreductor de corriente directa con el torque suficiente para la apertura de ésta.
- Para el accionamiento del gatillo de la pistola rociadora se utilizó una bobina de disparo acoplada a la carcasa.

- Para la chispa que producirá el encendido del gas se utilizó un sistema eléctrico del tipo de las estufas de gas domesticas que se encargara del encendido de la flama
- El diagrama de alambrado para el circuito total, así como sus conexiones se muestran a continuación. Figura 17.

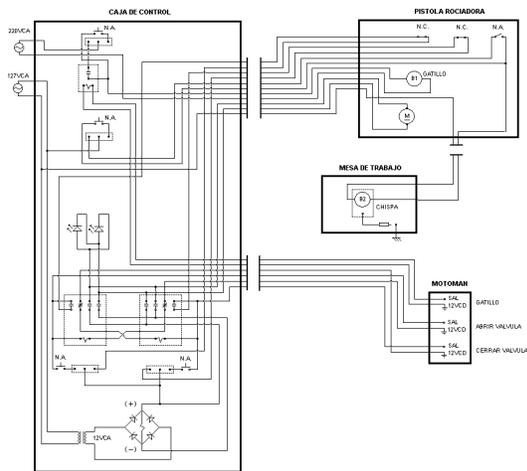


Fig.17 Diagrama de alambrado general

Todos estos elementos fueron diseñados para su automatización en modo manual o automático. Esto con la finalidad de poder realizar pruebas, ajustes o se quiera realizar mantenimiento a las piezas siempre y cuando el sistema se encuentre colocado en modo manual. A continuación se describen los procesos utilizados para la automatización.

SISTEMA DE ENCENDIDO DEL MOTOR

Se realizó un circuito con componentes que permitiera el accionamiento tanto manual como automático de un motor para la apertura de la válvula. Figura 18 y 19.

Material utilizado.

- 2 Relevadores de 4 polos, con bobina 24 VCD
- 1 Transformador 127 VCA / 12-24 VCD 2 Amp
- 4 Diodos 1N4001
- 1 Capacitor
- 1 Resistencia
- 2 Leds
- 2 Botones NA
- 2 Switches ON-OFF-ON, 3 polos, 2 tiros

- 2 Switches NC
- 1 Tablilla soldable
- 1 Motoreductor 12VCD

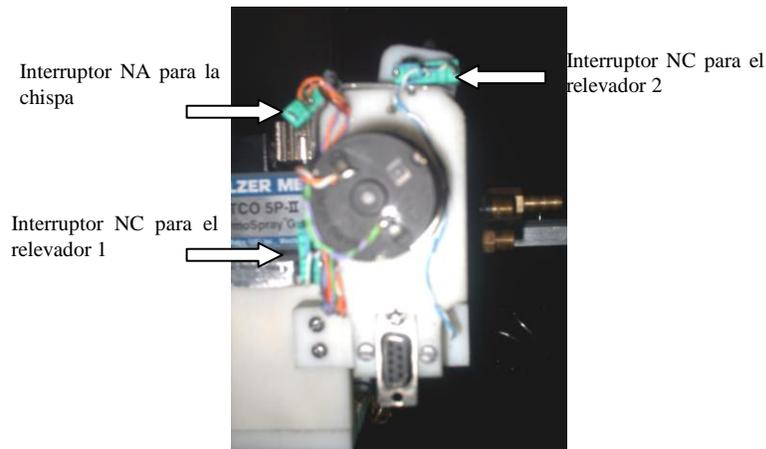


Fig.18 Acoplamiento del motoreductor a la carcasa de automatización

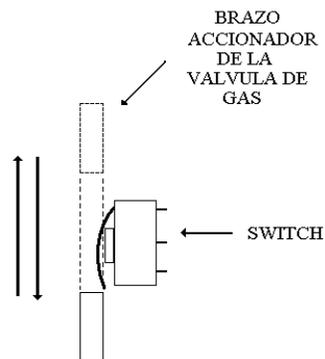


Fig.19. Accionamiento de Interruptor.

El circuito en conjunto se colocó dentro de una caja por medio de la cual se realizará el proceso de control de cada uno de los componentes para la automatización. Esta caja se recomienda sea colocada al lado del sistema de control del brazo mecánico. Figura 19.

Para su realización se utilizó el siguiente material.

- 1 Caja 30x25x10cm
- 1 Conector DB9 Macho
- 1 Conector DB9 Hembra
- 1 Conector DB25 Macho
- 1 Conector DB25 Hembra

Cable multiconductor

Cable bipolar (para 220V)



Fig.20 Caja de Control

La siguiente figura muestra cómo se encuentran colocados los botones y los interruptores de la caja de control.

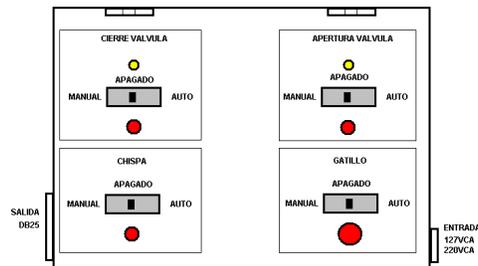


Fig.21 Mandos de la Caja de Control

Como se puede mostrar en la figura siguiente todos los componentes se distribuirán de la siguiente forma.

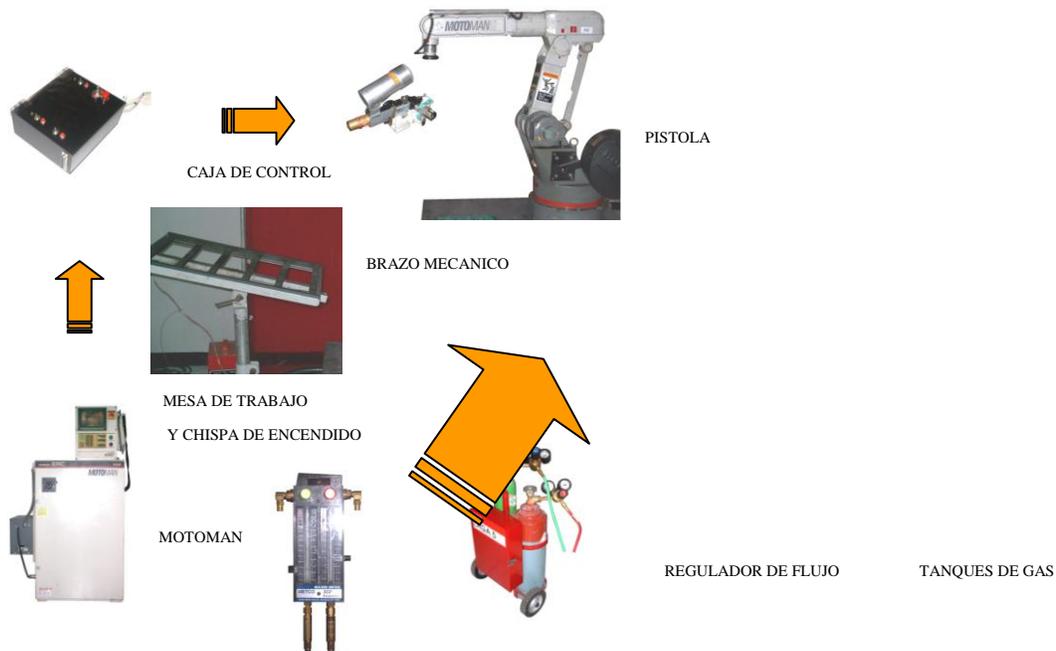


Fig.22 Conexiones Necesarias para la Automatización

En la siguiente figura se muestra el equipo diseñado acoplado al brazo mecánico.

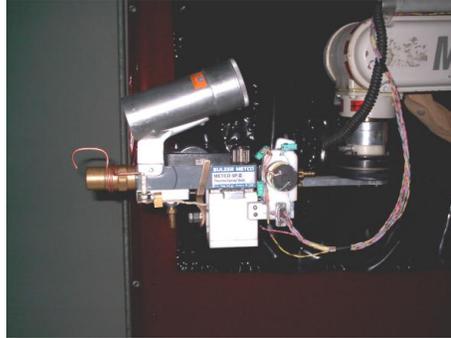


Fig.23 Acoplamiento

CONCLUSIONES.

De acuerdo al diseño planteado se puede esperar que las principales ventajas que nos proporcionará la automatización del proceso sean las siguientes:

Se llevó a cabo el diseño de elementos que fueron funcionales para la automatización del proceso.

Dentro de las consideraciones más importantes que se deben de tomar en cuenta para la automatización del proceso de proyección térmica se pueden mencionar la calibración de las piezas acopladas a la pistola (calibración de interruptores de la chispa y del motor, distancias del actuador del gatillo hacia el gatillo).

Es conveniente crear programas de control por medio del MOTOMAN con una mejor estructuración dando con ello una mayor precisión.

Para verificar la factibilidad de la automatización se llevaron a cabo varias pruebas de rociado consiguiendo una buena operación del equipo comparada con el proceso convencional

Se realizó la deposición de material y se compararon con placas con recubrimiento creadas en forma convencional, las placas con proyección convencional presento espesores irregulares y por consiguiente de mala calidad. Los recubrimientos con el sistema automatizado presentaron texturas de mayor calidad con un espesor más regular y una adecuada distribución del material.

Falta realizar una experimentación y caracterización más profunda de las piezas recubiertas para tener parámetros de deposición del proceso automatizado.

Se espera que con el sistema automatizado se pueda rehabilitar y reacondicionar productos que anteriormente se desechaban.

En la parte del control se realizaron pocas modificaciones, básicamente fueron: a) Ajustes en los interruptores. b) Cambios en el aditamento (sistema) cableado para detener el brazo de accionamiento de la válvula del gas, lo cual mostró que el diseño cumplió con las especificaciones planteadas.

La automatización traerá como consecuencia la mejora de las propiedades de los recubrimientos tales como: reducción de porosidad; lo que nos entrega por ejemplo un alto índice de mejora en la resistencia a la corrosión.

**REFERENCIAS.**

- [1]. Metal clusters in catalysis. Iguczi and H Knozinger. Ed. BC Gates. 1935
- [2]. Introducción a la metalurgia física. II edición. Sydney H. Avnner. 1979 Mc Graw Hill.
- [3]. La tecnología en el trabajo de los metales. Richard L. Little. 1980 Mc Graw Hill.
- [4]. Pugh, S., “Total design.” Ed. Adisson – Wesley Publishing Company, Great Britain, 1990.
- [5]. Procesos y materiales de manufactura para ingeniería. Lawrece E. Doyle. 1988 Prentice – Hall Hispanoamericana S.A.
- [6]. Metodología del diseño industrial. Francisco Aguayo González, Víctor M Soltero S. 2003 Alfaomega Rama.
- [7]. www.tycoelectronics.com
- [8]. <http://sulzer.com>
- [9]. Manual de entrenamiento para el operador capítulo I y II. Equipo brazo mecánico (MOTOMAN). 1992
- [10]. Matossian, M., “3D Studio Max.”, Ed. Visual Quick, CA USA, 1999



DESIGN FOR THE AUTOMATION OF COMBUSTION POWDER THERMAL SPRAY PROCESS.

Eduardo Garduño^{1,2}, J. Manuel Dorador González¹, Arturo Barba Pingarrón²

- 1.- Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 2.- Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Departamento de Materiales y Manufactura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510, México
egarduno@servidor.unam.mx, dorador@servidor.unam.mx, arbapin5@gmail.com

Abstract

This article shows the design sequence for the automation of combustion powder thermal spray process. With this process is possible obtain the coating of very different compositions with capabilities to achieve excellent corrosion and wear resistance. The elements obtained were validated using CAD modeling and 3D animation before their construction. A working prototype was produced using rapid prototyping techniques. Mechanical and electronic components were assembled together and adapted to a thermal spray gun attached to a robot arm that provided the necessary movements to generate combustion thermal spray coating process. Results produced with this automatic coating process are discussed.

1. Introduction

Thermal Spray technology is one of the deposition techniques utilized in Surface Engineering. This technique allows surface coating with different compositions, that could be metallic, ceramic or a combination of them. This kind of coatings can achieve better wear and corrosion resistance of parts and components.

The thermal spray process starts with the fusion of the materials that will be used for coating. This fusion is obtained with a number of energy sources, being one of the most common the combustion of gas mixtures of oxygen and acetylene in the inner part of a specially designed gun. The melted material is projected using an air or gas current that carry the melted particles and produces an impact with the target surface of the part. [1] [2]. The gun, usually is manipulated by a person that moves it continuously following a path.

The obtained coating with this conventional process can be porous and discontinuous in its thickness and adherence. These imperfections produce a low-quality coating, but can be reduced using an automatic deposition system that could produce better adherence and uniformity and reduce porosity.

In order to obtain the integration of the automated combustion powder thermal spray process is important to consider the characteristics of this process, namely: The aperture of the valves for the process gases, the activation of the ignition system of the gun, the movement of the trigger that allows the flow of the powder used for spraying. It is important, additionally, to consider that the weight of the components of the system must be kept to a minimum in order to allow the use of a low capacity robot.

2. Design proposal

The design of the components necessary for the proposed system was based on the methodology given by Pugh [4]. This method includes the following stages in the design process:

- Detection of the need



- Specifications
- Conceptual design
- Detailed design
- Manufacture

In order to achieve the automation of the combustion powder thermal spray system a conventional gun will be used, so the first step in the design was to obtain its dimensional and volumetric characteristics together with its operational parameters. A CAD model of the gun is shown in Figure 1.

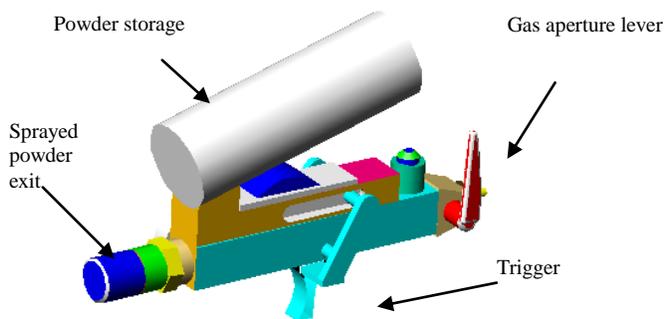


Fig 1: Spray gun, model 5PII, Sulzer Metco

3. Design of the mechanical components

The final design for supporting the spray gun and its container is shown in Figure 2. The support was built using 10 mm sheet of Aluminum 1100 AA. The holes are for the assembly of the cover, the gun and for allowing its attachment to a robot arm. This part was manufactured using a NC machine.

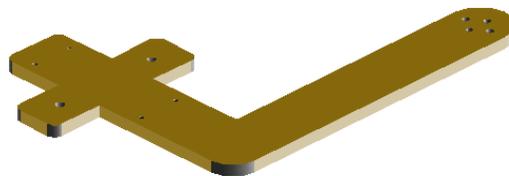


Fig 2: Support

The shutter system for moving the trigger of the spray gun was designed as shown in Figure 3.

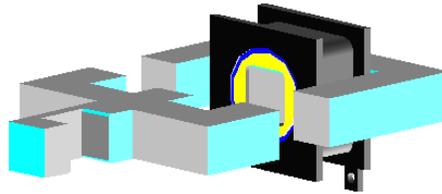


Fig 3: Shutter system for the trigger

In order to activate the trigger and protect its operation, housing is necessary. This housing is shown in Figure 4.

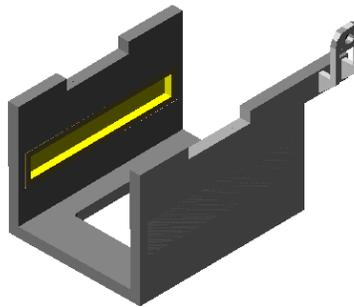


Fig.4: Housing

A critical section of the equipment is the aperture system of the gas valves. In order to obtain this movement, a part was designed to apply the necessary force to the valve using a CD motor with sensors, for obtaining the positions of maximum and minimum apertures. This system is shown in Figure 5.

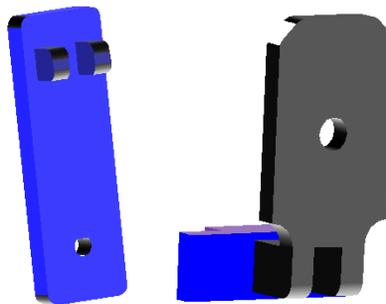


Fig 5: Parts for opening system of the gas valves.

The above mentioned parts were manufactured using a rapid prototyping system that allowed obtaining complex parts in ABS polymer, which is light and functional. The complete assembly of the system is shown in Figure 6.

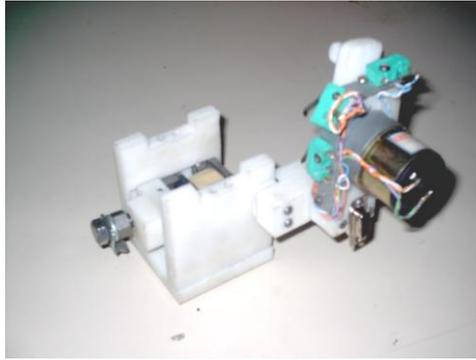


Fig 6: Assembly of the automation system

The assembly of the automation system, the support and the spray gun is shown in Figure 7. Figure 8 and 9 show the system mounted in the robot arm.

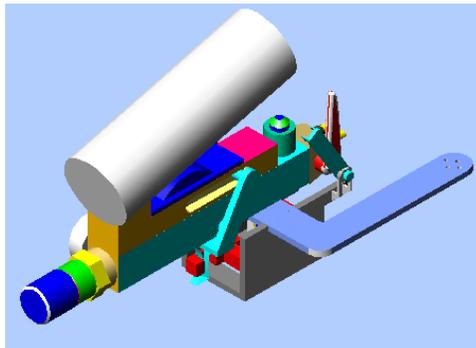


Fig 7: Spray gun with the automation system assembled.

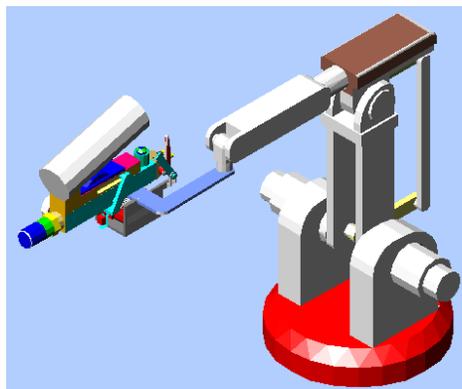




Fig 8: Robot arm with the automated combustion powder thermal spray gun attached.

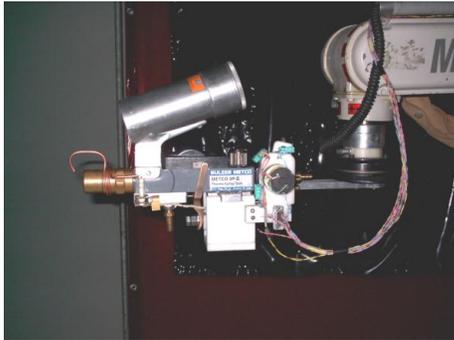


Fig 9: Prototype attached to the robot

4. Design of the electronic system

The selection of the system actuators was made simultaneously with the design of the mechanical components, in order to ensure an adequate mechatronics system.

For the aperture of the gas valves a geared CD motor was selected and mounted as shown in Figure 10.

For the activation of the trigger of the gun a solenoid was selected.

For obtaining the spark for starting the flame a commercial system used in **stoves** was selected.

The system can be used both in automatic or manual mode. This idea was decided to allow testing and maintenance of the individual systems.

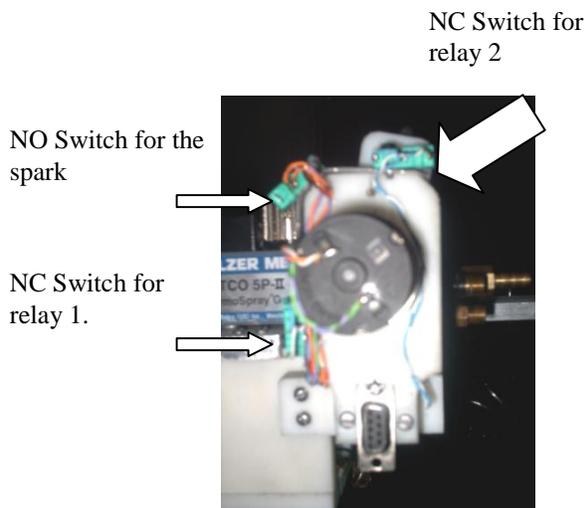
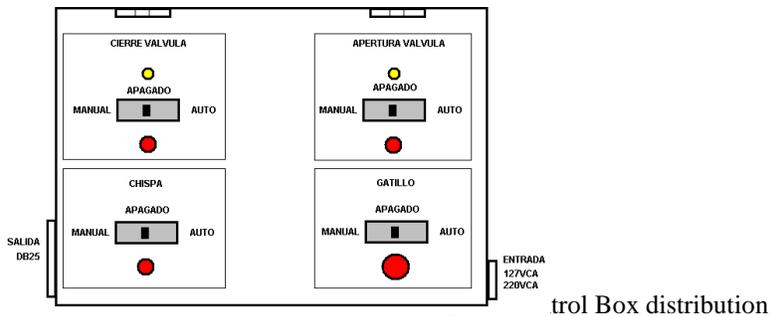


Fig 10: Geared motor coupling to the housing of the automation system.



The circuit was placed inside a box that will be used for controlling all the components of the system. Figure 11 shows the position of the buttons and switches



The wiring diagram for the circuit and its connections is shown in Figure 12.

5. Results

The automatic system was tested using a powder named as 12C, whose main characteristics are the hardness 30-35 Rc, recommended for high wear and corrosion resistance. Its melting point is between 1010 and 1065 °C. Composition of the powder include a combination of Ni-Cr-Fe-B-Si The parts to be coated were prepared using a cleaning step using a trichlorinethylene solution and after were preheated for ten minutes using the flame of the gun at a distance of 10 cm.

Several tests were carried out for determining the better path for the spraying of the surface. The desired coating thickness was between 1.0 and 1.2 mm.

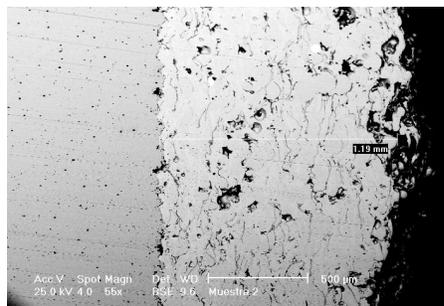




Fig 13: Image of the automated combustion powder thermal spraying process.(ACPTSP) operating.

The experimentally obtained equation for determining the coating thickness is as follows:

$$Y = 0.8401 X$$

Where Y is the thickness and X the application time of thermal spray.

Figures 14 shows a micrograph of a Ni-Cr-Fe-B-Si coating obtained with a manual combustion powder thermal spray and figures 15 and 16 show photos obtained with automated system and observed with a scanning electron microscope (SEM) of the coated surfaces. Its clear that the use of the automated system increase the adherence and diminish the porosity of the coating

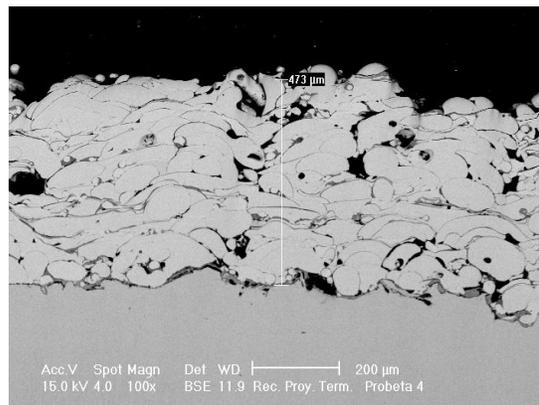


Figure 14.- SEM Micrograph of a Ni-Cr-Fe-B-Si coating obtained by a conventional manual combustion powder thermal spray process. Its possible to see limited adherence and high porosity.

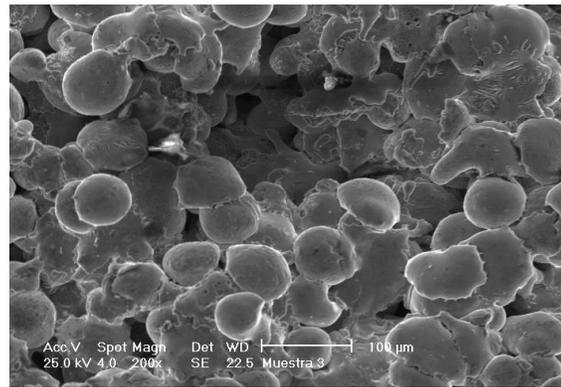


Fig15: SEM Micrograph showing the structure of the coated surface obtained with ACPTSP.SE. 200 X.

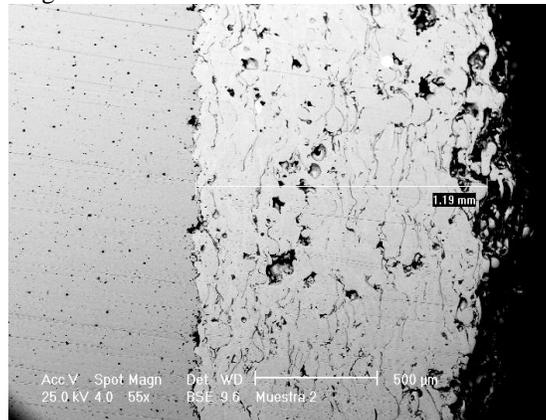


Fig 15: SEM Micrograph of the Ni-Cr-Fe-B-Si coating showing better uniformity of thickness and reduced porosity of the coated surface obtained with ACPTSP. BSE 55X

6. Conclusions

The results obtained with the automatic system were compared with coatings obtained in a conventional way. The continuity and adherence of the coated surfaces was better than the obtained with the manual process and the porosity was reduced. All the material was perfectly coated to the parts, fulfilling the objectives stated at the beginning of the research.

Thanks to the automation of the systems of the combustion powder thermal spray process can now be considered as a real alternative for high quality coating systems. This automatic process represents a real alternative for industrial products that have a short life in use. Besides, coating is a process that can be used for rehabilitation of components allowing their reutilization.



References

- [1] Iguczi and H Knozinger, 1935, Metal clusters in catalysis. Ed. BC Gates.
- [2] Sydney H. Avner, 1979, Introducción a la metalurgia física. 2nd Edition. Mc Graw Hill.
- [3] Richard L. Little, 1980, La tecnología en el trabajo de los metales. Mc Graw Hill.
- [4] Pugh, S., 1990, Total design, Ed. Adisson Wesley Publishing Company, Great Britain.
- [5] Lawrence E. Doyle. Procesos y materiales de manufactura para ingeniería. 1988 Prentice – Hall Hispanoamericana S.A.

REFERENCIAS.

1. [Metal clusters in catalysis](#). Iguczi and H Knozinger. Ed. BC Gates. 1935
2. [Introducción a la metalurgia física](#). II edición. Sydney H. Avner. 1979 Mc Graw Hill.
3. [La tecnología en el trabajo de los metales](#). Richard L. Little. 1980 Mc Graw Hill.
4. J.R Davis & Associates. [Handbook of thermal spray technology](#). ASM Thermal Spray Society. USA, 2004
5. Lech Pawloski. [The science and engineering of thermal spray coatings](#). British Library Cataloguing. England,1995
6. Groover, Mikell P. [Fundamentos de manufactura moderna](#). Prentice Hall 1a Edición, México, 1997.
7. William D. Callister Jr. [Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales](#). Editorial Reverté, 5a reimpresión, Bracelona 2001.
8. Donald R. Askeland. [La ciencia e ingeniería de los materiales](#). Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1987
9. Francisco Martínez Pérez. [La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento](#). Editorial Limusa, México,1996.
10. Sangines Franchini Maria. [Desgaste de Metales](#). Editorial Limusa, México,1990
11. T.S Eyre. [Treasures on materials science and technology VOL 13](#) . Academic press Inc. Brunell University, England
12. Budinski, J.G "Needs and applications measurement and monitoring of wear" [Journal of testing and evaluation](#)", JTVA, VOL 25, No.2 March 1997.



13. [G99- 90 standar tests method for wear testing with pin o disk](#) , Anual ASTM publication_2001
14. M.P Andres. "[Desgaste mecánico : aspectos metalúrgicos y modo de acción en engranes y piezas de automovil](#)" Revista Metal CENIM VOL 17,1981
15. Sulzer metco Type 5P-II Thermospray Gun "[Instructions](#)" 1995.
16. Sulzer metco 12C "[Specifics](#)" 1995.
17. Garduño Eduardo, Tesis "[Estudio comparativo de niquelado químico, niquelado químico compuesto con adición de partículas duras de óxidos de cromo y fullerenos](#)"
18. <http://www.gordonengland.co.uk>
19. [http://www. disagroup.com](http://www.disagroup.com)
- 20.http://www.sciencedirect.com/engineering_tribology/Publication.
- 21.http://www.tesisenxarxa.net/tesis_ub/available/0517107-h0032//00mgb_previo.pdf.



CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO DE ACERO INOXIDABLE SOBRE ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO

Eduardo Garduño, Arturo Barba Pingaron, Javier Cervantes Cabello, Israel Garduño García
Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Departamento de Materiales y Manufactura.
Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510, México
Tel. 56 –22-80-50, Fax 56-22-80-55

abarba@servidor.unam.mx, egarduno@servidor.unam.mx

Resumen: En este artículo se muestra el desarrollo experimental llevado a cabo para dotar de mejores propiedades superficiales a aceros de bajo carbono, especialmente lo relativo a la resistencia al desgaste de estos materiales, mediante la deposición de un recubrimiento de Acero inoxidable que ha sido depositado por medio de la técnica de rociado térmico de forma manual.

Los recubrimientos obtenidos se han evaluado mediante ensayos de microdureza, y a través de técnicas de microscopía electrónica y microanálisis. Los recubrimientos obtenidos han mejorado la resistencia al desgaste y la corrosión sin afectar la microestructura del sustrato.

Abstract: This article contains a description of the experimental development to improve properties of low carbon steel, especially wear resistance, employing coatings of stainless steel using the manually technique of thermal spraying gun attached to a robot arm provided the necessary movements to generate adequate coating.

Coatings obtained of stainless steel were characterized employing microhardness, techniques of scanning electro microscopy and microanalysis. These technologies not modify the microstructure and are a valuable alternative to improve wear resistance.

INTRODUCCIÓN.

La proyección térmica forma parte de las técnicas de deposición superficial integradas en lo que se denomina Ingeniería de Superficies y es un grupo de tecnologías empleadas para obtener recubrimientos de diferentes materiales, comúnmente constituidos de materiales metálicos, cerámicos o una combinación de ambos, sobre una gran variedad de sustratos, lo que permite conseguir una sustancial mejora en propiedades tales como resistencia al desgaste y a la corrosión de piezas y componentes.

El proceso consiste en primer lugar en fundir los materiales con los que se desea recubrir, empleando una gran variedad de fuentes de energía. Las más comunes son la combustión generada por mezclas de gases como oxígeno y acetileno, en el interior de una pistola convenientemente diseñada. El material fundido es proyectado hacia la superficie a recubrir usando para ello una corriente de aire (u otros gases) para conseguir que las partículas fundidas viajen y se impacten contra la superficie del sustrato para ir generando así el recubrimiento. [1] [2].

El uso de tecnologías para recubrimientos superficiales es cada vez más requerido y utilizado hoy en día, entre los diferentes procesos existen diferencias y características que son un factor muy importante para su elección, como lo son geometría a recubrir, materiales de trabajo, espesor deseado entre otros.

La búsqueda de un recubrimiento con el cual se obtengan beneficios en cuanto a costos, manejabilidad y principalmente calidad, es el motivo por el cual, en este artículo, se presenta la caracterización del equipo de proyección térmica por flama con alimentación de alambre de acero inoxidable alto en cromo sobre probetas

de acero de bajo contenido de carbono y geometría plana, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este trabajo se realizó la experimentación del mismo mediante la siguiente metodología:

1) OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA GRANALLAR

El procedimiento que se describe para la caracterización del proceso de proyección térmica se logró mediante el uso de del equipo de proyección por flama con el que cuenta el Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se detallan a continuación

Se obtuvieron probetas de acero de bajo contenido de carbono de 2 in (5.08cm) de ancho y $\frac{1}{4}$ in (6.35mm) de espesor, el primer paso fue cortar probetas a una longitud de 10cm, y desbastando cada una de sus aristas (chaflán) para eliminar los filos y evitar un desprendimiento del recubrimiento en esas zonas como se muestra en la Figura 1, posteriormente se eliminaron las impurezas de la superficie como son: óxidos, grasas, partículas como rebabas o polvos etc.



Figura 1. Probeta de acero cortada, con chaflán.

2) OBTENCIÓN DE RUGOSIDAD

El siguiente paso fue obtener una superficie con una rugosidad adecuada para la deposición del recubrimiento, para ello se experimentó con un equipo de granallado utilizando los siguientes parámetros:

- Presión de aire del compresor.
- Distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato.
- Tiempo de granallado.

El procedimiento para determinar la rugosidad óptima de la superficie de las probetas fue el siguiente:

Se seleccionó un tipo de granalla con forma angular de óxido de aluminio (café F-12 CH) de malla 12. Tomando como valores constantes para el granallado de las probetas los valores de: Presión de aire del compresor de 7 Bar, distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato de una pulgada.

- a) El granallado de probetas, ver figura 2, en las cuales, la variable a manejar fue el tiempo, el cual se tomó a intervalos de 0.5 minutos, de 0 a 5 minutos, y posteriormente ampliar el intervalo a 2 y 3 minutos.



Figura 2. Proceso de granallado

- b) La rugosidad obtenida se analizó por medio de un rugosímetro digital (Mitutoyo SurfTest-402), figura 3, el valor de rugosidad obtenido con cada variación de tiempo.



Figura 3. Rugosímetro digital.

- c) Se graficaron y analizaron los resultados obtenidos, los cuales utilizaran más adelante.
d) Se obtuvieron los parámetros más adecuados para el granallado.

3) OBTENCIÓN DE PROBETAS PARA PROYECCIÓN TÉRMICA

Posteriormente se procedió a granallar todas las piezas con los parámetros obtenidos, consiguiendo una superficie con una rugosidad homogénea como lo muestra la figura 4.



Figura 4. Probeta granallada.

4) LIMPIEZA

Previo al proceso de proyección térmica se limpió cada placa con alcohol industrial (Alcohol Metílico Anhidro: Mallinckrodt Baker, S. A. de C. V.), para evitar que tenga impurezas como grasa, polvo u otras partículas.

5) PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA

Para el proceso de proyección térmica se utilizó alambre de acero inoxidable de alto contenido de cromo, Fe 13Cr 0.5Si 0.5Ni 0.5Mn 0.35C

➤ Equipo utilizado

El proceso de proyección térmica por flama y con aporte de alambre se muestra en la figura 5.

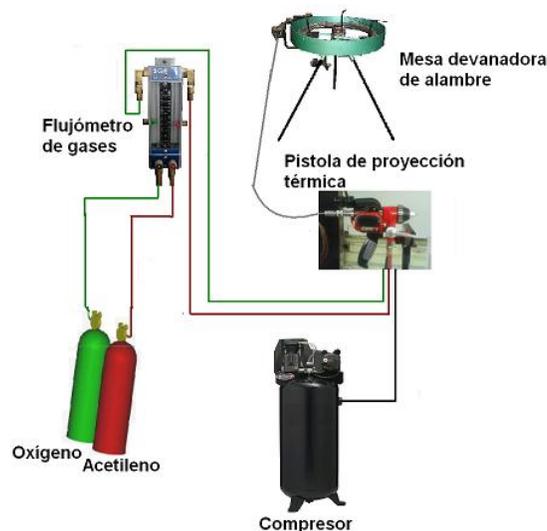


Figura 5. Equipo de proyección térmica por alambre

Para el buen desarrollo del proceso y obtención del recubrimiento es necesario considerar una serie de parámetros que se describen a continuación.

➤ Presión de aire:

La presión de aire a la salida del compresor debe ser igual o mayor a 5 Bar, este parámetro es proporcionado por el proveedor del equipo, además de que el flujo de aire debe ser abundante, por lo que se deben evitar reducciones en la conexión pistola-compresor.

➤ Lectura del flujómetro de gases

Para el proceso se debe considerar la lectura de los manómetros en los cilindros (presiones de trabajo) y en el flujómetro de los gases, oxígeno y acetileno, los cuales se manejan en base al material utilizado.

➤ Distancia entre la boquilla y la superficie de la probeta

Se tomaron diferentes huellas de proyección considerando los parámetros del proceso de granallado y de lectura de gases, con un tiempo de 1 minuto, haciendo únicamente variaciones de la distancia entre la boquilla de la pistola y la superficie de cada probeta

Una vez obtenido este patrón de huellas de proyección a diferentes distancias se procedió a extraer una pequeña muestra de la huella de cada probeta utilizando una cortadora abrasiva marca BUELER Abrasimet 2, y un disco para corte metalográfico marca BUELER 10-4212, Hard steel y realizó el proceso metalográfico.

Posteriormente se analizaron estas muestras mediante microscopia electrónica de barrido para determinar las características de cada muestra de huella obtenida por medio de un microscopio electrónico de barrido marca Philips serie XL20

Estas partes son analizadas por medio de

Finalmente se procede al análisis de los resultados obtenidos para determinar el parámetro de distancia entre la boquilla de la pistola y la superficie de la probeta.

➤ Tiempo

Este parámetro es el único que varía durante todo el proceso de proyección térmica en todas las probetas.

➤ Pre calentamiento

El pre calentamiento de las probetas se realiza con la misma flama de la pistola de proyección térmica (con la válvula de flujo de alambre cerrada) a una temperatura de 90°C para evitar el fácil desprendimiento del recubrimiento por sobrecalentamiento. En todo el proceso se deben de medir las temperaturas de las probetas para evitar cambios que afecta la deposición. Para ello se utilizó un termómetro digital marca EXTECH Instruments 42510.

Para el proceso de proyección térmica se realiza el recubrimiento: estando las probetas en posición horizontal, avanzando en forma de zigzag de arriba hacia abajo y viceversa, ver figura 6.

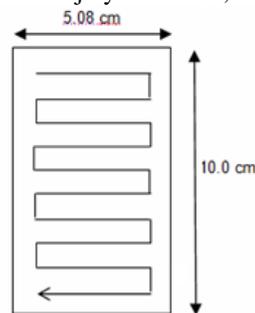


Figura 6. Trayectoria utilizada en el proceso de granallado y de proyección térmica.

Las piezas se sujetaron por medio de una prensa que permitió la manipulación y acomodo a un ángulo de 90° entre la superficie de la probeta y la boquilla de la pistola, ver figura 7.



Figura 7. Proceso de proyección térmica con alimentación de alambre.

La temperatura de cada una de las probetas debe ser controlada, esto se hizo por intervalos de tiempo (constantes de 1 minuto) de proyección para evitar su sobrecalentamiento, y por medio de su permanencia al aire libre para disminuir su temperatura y tener el control del intervalo de temperatura.

Los recubrimientos obtenidos se caracterizaron por medio de microscopía electrónica y microdureza Vickers en un área de sección transversal perpendicular a la cara recubierta, tomando una pequeña muestra de cada una de las probetas.

RESULTADOS

A continuación se describen los resultados que permitieron la obtención de la deposición de los recubrimientos de acero inoxidable sobre acero de bajo contenido de carbono

1) PROCESO DE GRANALLADO

- Parámetro de distancia en el proceso de granallado.

La Tabla 1 muestra los datos obtenidos en las pruebas de variación de tiempo de granallado contra rugosidad, con los cuales se obtuvo su curva característica, figura 8, para determinar el parámetro de tiempo de granallado.

Número de Probeta	Tiempo [min]	Rugosidad [μm]
1	0.5	6.6
2	1	8
3	1.5	8
4	2	8.5
5	2.5	10.2
6	3	8.6
7	3.5	8.8
8	4	9
9	4.5	8.9
10	5	7.8
11	8	8
12	10	8.2

Tabla 1. Valores característicos de tiempo de granallado contra rugosidad.

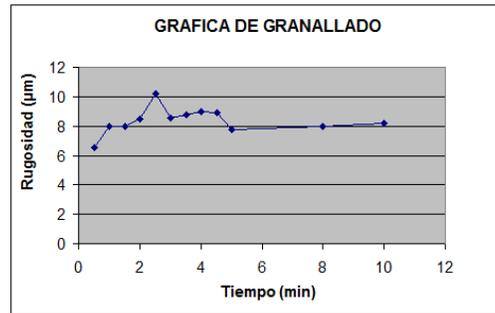


Figura 8. Curva característica de granallado, rugosidad contra tiempo.

Por medio de la geometría de la superficie a trabajar y del tiempo invertido en el proceso, la velocidad de la pistola de granallado respecto a la superficie de la probeta es 50.8 [cm/min]

Para el rango de valores utilizado, se puede notar que la rugosidad mínima obtenida es de 6.6 [μm] y la máxima de 10.2 [μm]. Para este trabajo se utilizaron los parámetros que permitieron una rugosidad promedio de 8.3 [μm].

Para estas condiciones las probetas de acero presentaron una adecuada rugosidad para un tiempo de 2 minutos; para tiempos mayores a este el comportamiento no tiene un cambio significativo de rugosidad superficial, lo que permitió seleccionar el tiempo de granallado de 2 minutos.

Con estas condiciones se pudo obtener los parámetros para el proceso de granallado:

- Presión de aire a la salida del compresor: 7 [Bar]
- Distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato: 1 [in]
- Tiempo de granallado: 2 [min]

2) PROCESO DE PROYECCIÓN TERMICA.

La prueba de análisis químico realizada en el microscopio electrónico, ver figura 9, muestra los componentes del alambre utilizado después de ser proyectado en una zona del material base, lo que permite validar que el recubrimiento obtenido es el acero inoxidable.

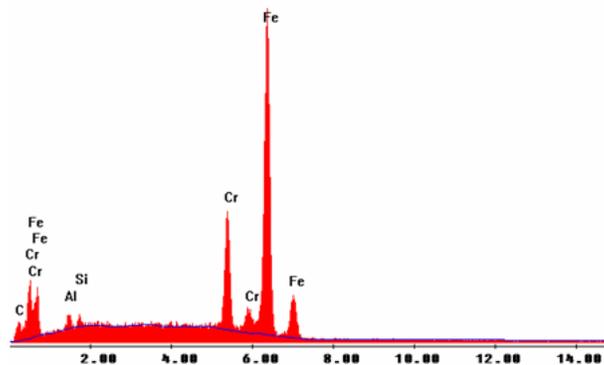


Figura 9. Resultado del análisis químico sobre una zona del recubrimiento.

- Distancia entre la boquilla y la superficie de la probeta, patrón de huella.

Como resultado del análisis de las pruebas de microscopía electrónica, se obtuvieron las mejores características en las probetas proyectadas a 9, 10 y 11 [in]. Se tomó como parámetro óptimo la distancia de 10 [in], principalmente debido a que éstas presentaron, en el área de unión del recubrimiento y material base: una aceptable adherencia entre la probeta y el recubrimiento debido a una considerable disminución de porosidades y de inclusiones de óxido, una muy buena homogeneidad en cuanto a las capas, tanto internas como en la superficie del recubrimiento y de partículas fundidas de material de alimentación, ver figura 10.

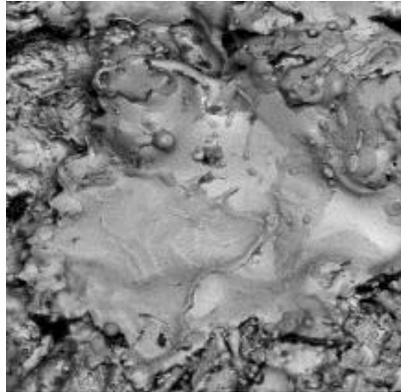


Figura 10. Splat formado en una superficie aceptable.

En las figuras 11, 12 y 13 se muestran imágenes las cuales son evidencia de la obtención del recubrimiento

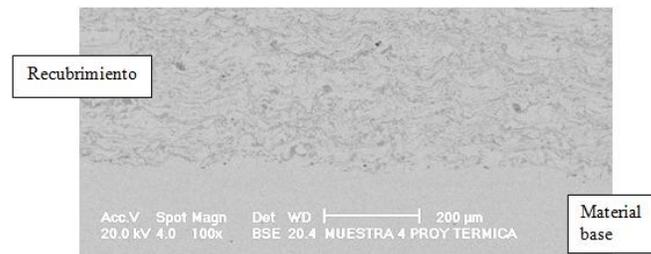


Figura 11. Imagen representativa del proceso a una distancia de 10 [in], 100X

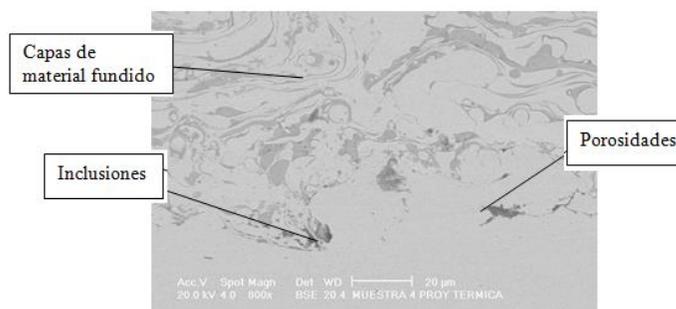


Figura 12. Características típicas del proceso, 800X

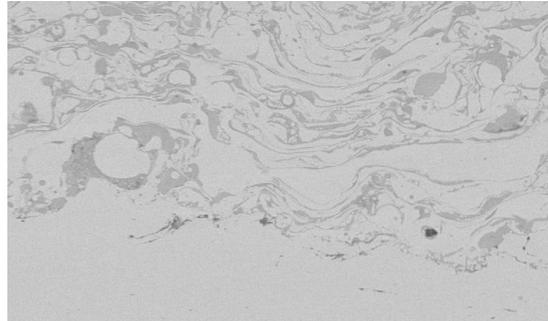


Figura 13. Zona con disminución de porosidades e inclusiones, característica obtenida con los parámetros trabajados, 500X.

Las probetas proyectadas en un intervalo diferente a 9-11 [in], no son lo suficientemente aceptables como parámetro de distancia, debido a que presentan:

- A una distancia menor a 9 [in]: Un exceso de calor, esto se refleja en un cambio de coloración, tanto en la probeta como en la superficie del recubrimiento, tomando un color oscuro típico de un sobrecalentamiento de una placa de acero, derivado de esto presentan también un mal acabado superficial y una deficiente adherencia entre recubrimiento y probeta.
- A una distancia mayor a 11 [in]: Una deficiente adherencia entre recubrimiento y probeta debido a que a mayor distancia, las partículas fundidas de material no logran conservar completamente su estado líquido, provocando una gran cantidad de porosidades, tanto en las capas internas como en la superficie, provocando además, un mal acabado superficial, ver figura 14.

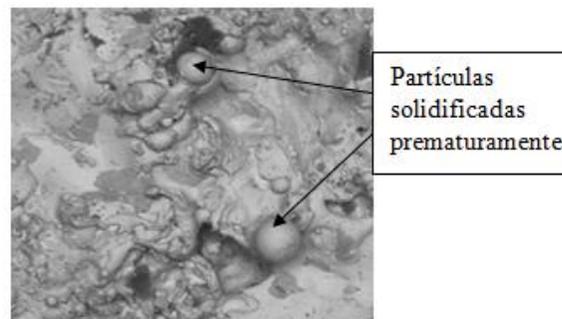


Figura 14. Partículas formadas en una superficie con mal acabado.

- Proceso de proyección térmica a diferentes tiempos.
A continuación se muestran en la tabla 2 los datos de los espesores obtenidos mediante la variación del tiempo de proyección en cada probeta.

Número de probeta	Tiempo de proyección [min.]	Espesor [μm]
1	0.15	68.97
2	0.30	93.45
3	0.50	145.33
4	1.00	281.69
5	1.50	383.0
6	2.00	781.69
7	2.50	908.45
8	3.00	1049.3
9	4.00	1126.76
10	5.00	1408.45
11	7.00	2436.62
12	10.0	3267.61
13	13.0	3457.75
14	17.0	8528.17
15	30.0	15531.91

Tabla 2. Valores característicos del proceso de proyección térmica por alambre.

Como podemos observar en la figura 15, la curva característica del proceso de proyección térmica presenta dos comportamientos notorios diferentes.

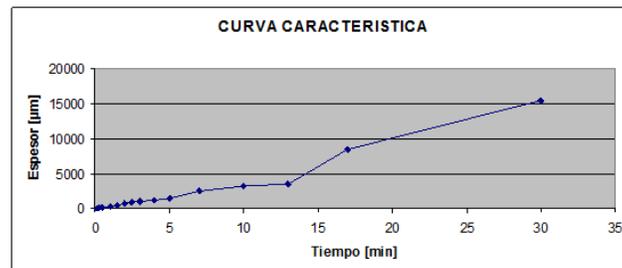


Figura 15. Curva característica del proceso de proyección térmica por alambre, espesor contra tiempo.

De estos dos comportamientos, el primero tiene un comportamiento lineal dentro del intervalo de 0.15 [min] (1 capa de recubrimiento) hasta 13 [min], incrementando el espesor del recubrimiento de manera proporcional al tiempo de proyección como se muestra en la figura 16.

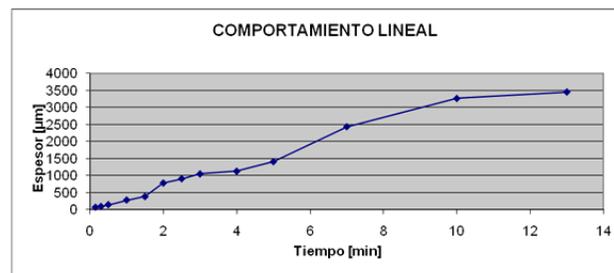


Figura 16. Intervalo de la curva característica de proyección térmica por alambre con comportamiento lineal.

Esta parte de la curva con tendencia lineal es aproximada al siguiente modelo matemático en función del tiempo de protección:

$$y[\mu\text{m}] = 288.063 x[\text{min}] + 1.3[\mu\text{m}]$$

Donde:

$y[\mu\text{m}]$ = Espesor del recubrimiento

$x[\text{min}]$ = Tiempo de proyección.

O en función del espesor del recubrimiento:

$$x[\text{min}] = (y[\mu\text{m}] - 1.3[\mu\text{m}]) / 288.063$$

La figura 17 muestra gráficamente la curva característica del proceso y la aproximación lineal de dicho modelo matemático.

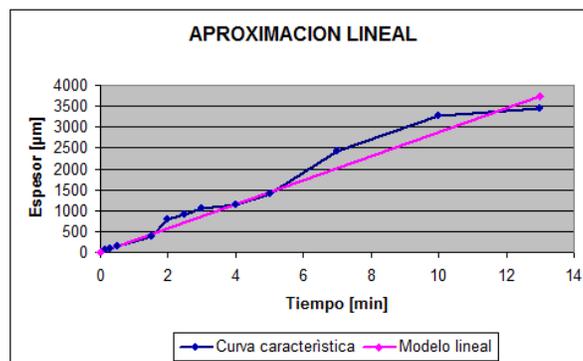


Figura 17. Representación gráfica de la curva característica del proceso y del modelo lineal.

Físicamente, en dicho intervalo, la forma de la superficie de las probetas resultó prácticamente homogéneo, sin cambios significativos en cuanto al plano formado por la superficie del recubrimiento y el plano formado en un inicio por la superficie previamente preparada de la probeta, ver figura 18.



Figura 18. Vista lateral de probeta con recubrimiento a 4 [min].

El segundo comportamiento, a partir de los 13 [min], en cuanto al espesor pierde su homogeneidad, regularidad y linealidad y hay presencia de deformaciones en la superficie de las probetas, ver figura 19.

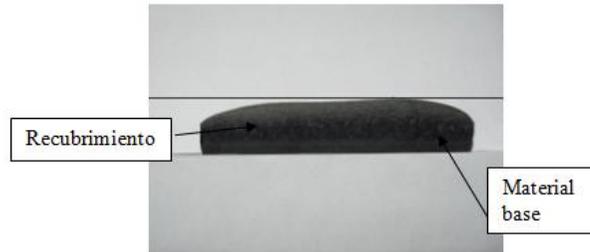


Figura 19. Vista lateral de probeta con recubrimiento a 30 [min].

De acuerdo a los resultados obtenidos y al análisis de las probetas realizadas se puede seleccionar la probeta en base a los requerimientos y desempeño de los mismos.

El cambio físico presentado en las probetas con un tiempo de proyección mayor a 13 [min] (aproximadamente 3.5 [mm] de recubrimiento) se debe a que, a partir de este tiempo de proyección, el recubrimiento presenta un aumento de densidad, este aumento es provocado por la saturación de material de alimentación por cada capa y por la disminución de concentración de cromo, el cual debido a la misma saturación, tiende a migrar en zonas libres como son espacios intrasplats o porosidades, favoreciendo la saturación y el aumento de densidad. En comparación con la morfología interna de los recubrimientos con un tiempo menor a 13 [min] se observa un arreglo diferente en cuanto a la forma en que se posicionan los splats, presentan una forma con menor grado de compactación el cual se puede observar en la morfología interna del recubrimiento, ver figura 20, 21 y 22, lo anterior provoca la pérdida gradual de la homogeneidad superficial inicial, dando como resultado esta irregularidad en la superficie.

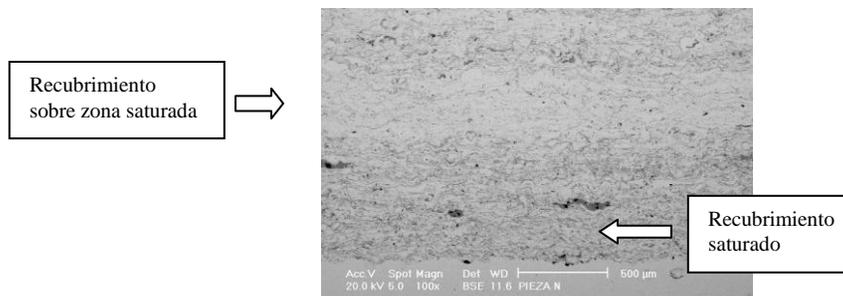


Figura 20. Recubrimiento en el cual se muestra una zona saturada con una gran cantidad de splats deformados e irregulares, y una zona no saturada con splats regulares.

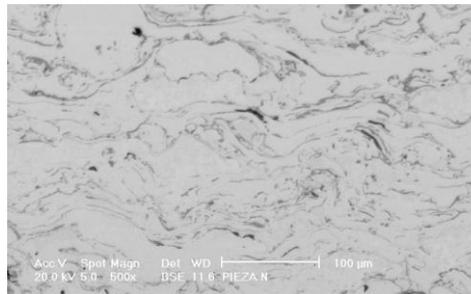


Figura 21. Recubrimiento no saturado, con splats regulares.

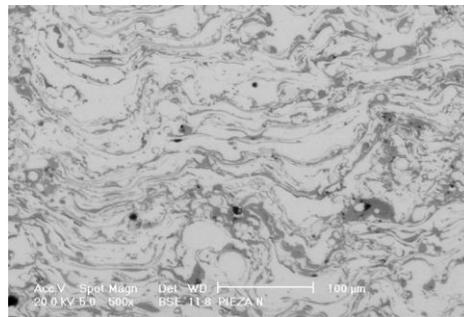


Figura 22. Recubrimiento saturado

Es posible continuar el proceso y seguir incrementando el espesor del recubrimiento, (para este caso, se suspendió el proceso hasta un espesor aproximadamente de 15.5 [mm] debido a que en ningún momento se presentó indicio alguno de desprendimiento del recubrimiento) teniendo en cuenta estas consideraciones, pero es importante notar que el recubrimiento tiende a ser irregular.

Concluyendo los parámetros y características ya mencionados en este proceso:

- Velocidad de avance lineal de la pistola de alambre: 34.5 [m/min]
- Velocidad de deposición: 11.4 [g/min]
- Eficiencia de deposición: 37.8%.

➤ Pruebas de microdureza Vickers.

Las pruebas de microdureza Vickers fueron realizadas en la zona cercana y mas alejada del espesor de recubrimiento con respecto a la superficie proyectada, figura 23.

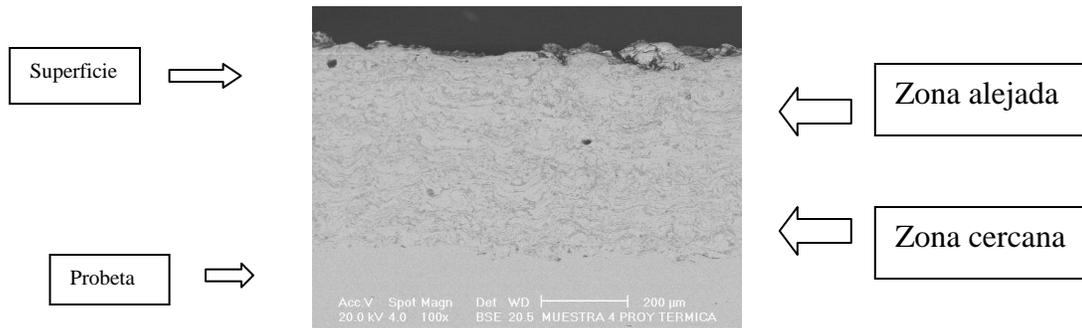


Figura 23. Zonas de medición de microdureza.

La tabla 3 muestra los valores característicos obtenidos en las mediciones de microdureza Vickers.

Número de probeta	Tiempo de proyección [min]	Microdureza en zona alejada [Vickers]	Microdureza en zona cercana [Vickers]
3	0.50	456.7	459.4
4	1.00	474.3	418.2
5	1.50	497.0	439.3
6	2.00	478.0	452.7
7	2.50	442.0	395.3
8	3.00	510.6	457.0
9	4.00	478.0	474.3
10	5.00	432.3	452.6
11	7.00	485.0	485.0
12	10.0	540.0	464.7
13	13.0	442.5	447.8
14	17.0	436.0	384.0
15	30.0	452.3	374.5

Tabla 3. Valores característicos de microdureza Vickers.

En las probetas número 1 y 2 no fue posible realizar la medición de microdureza debido a la delgada capa de recubrimiento obtenido.

El valor promedio de microdureza en la zona alejada al material base es de 471.13 [Vickers]

El valor promedio de microdureza en la zona cercana al material base es de 438.79 [Vickers]

El valor promedio de microdureza del material base fue de 90 [Vickers], la figura 24 muestra las curvas características de microdureza obtenidas.

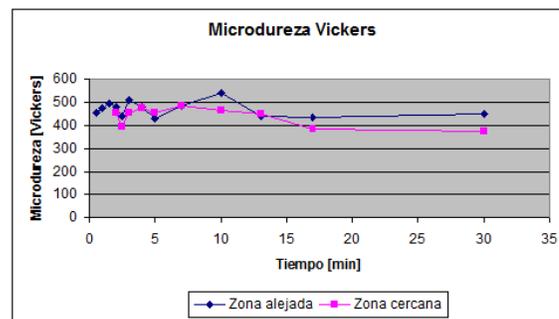


Figura 24. Curvas características de microdureza Vickers en zonas: alejada y cercana.



En general, las pruebas de microdureza Vickers realizadas en las dos zonas de las probetas (zona alejada y cercana al material base) no presentaron diferencia significativa entre si, un promedio de 30 [Vickers] de mayor dureza en la zona alejada, debido a que, como se mencionó anteriormente, en la zona mas cercana es donde se produce la saturación del material de alimentación y donde el cromo tiende a agruparse, por lo tanto al ser el hierro mas duro y denso que el cromo, provoca que en general disminuya un poco el promedio de microdureza en esta zona alejada.

CONCLUSIONES

Por medio de la experimentación es posible concluir que:

En el proceso de granallado, el parámetro de rugosidad es determinante para la obtención del recubrimiento deseado, esta rugosidad se obtuvo al trabajar con los siguientes parámetros:

- Presión de aire a la salida del compresor: 7 [Bar]
- Distancia entre la boquilla de la pistola granalladora y la superficie del sustrato: 1 [in]
- Tiempo de granallado: 2 [min]
- Velocidad de la pistola de granallado respecto a la superficie de la probeta es 50.8 [cm/min]

En el proceso de proyección térmica, el parámetro determinante es la distancia entre la boquilla del equipo de proyección térmica y la superficie del material base, esta distancia es aceptable dentro del siguiente intervalo:

- No menor a 9 [in] y no mayor a 11 [in], siendo la distancia a 10 [in] la más recomendable a trabajar debido a que proporciona una mejor calidad en el recubrimiento depositado.

La obtención de los parámetros determinantes anteriores fue la base para obtener satisfactoriamente el recubrimiento superficial propuesto al inicio en el objetivo de este trabajo.

Cabe señalar que el incremento de espesor de recubrimiento sobre el material base es prácticamente homogéneo y lineal hasta un espesor aproximadamente de 3.5 [mm] con un tiempo de proyección de 13 [min], es posible continuar incrementando el espesor, teniendo en cuenta las características que se presentan, debido a que cada vez que se rocía una cantidad de alambre la superficie resultante presenta un nuevo grado de rugosidad que favorece, sin duda, al anclaje del próximo rociado, pero con un grado mayor de irregularidades que no favorece a la homogeneidad de la superficie ni a la morfología interna.

Estas irregularidades son la principal desventaja del proceso al sobrepasar el límite de espesor de recubrimiento homogéneo, que con este trabajo se propone a 3.5[mm].

Se logró obtener un espesor de recubrimiento mayor al mencionado en la literatura que es de 0.25 [in] (0.635 cm), esto fue posible debido al proceso de preparación de la superficie a recubrir, al debido control de la temperatura y a la obtención de los parámetros del proceso.

En comparación al proceso de proyección térmica por polvos, se logró disminuir considerablemente el contenido de porosidades e inclusiones, siendo así, una opción efectiva para la aplicación de recubrimientos, sobre todo debido a la relativa rapidez con que se obtienen espesores de mayor dimensión y a la inversión en cuanto a costo que continua siendo, entre su ramo, una opción conveniente por no ser tan elevado.

Se obtuvieron recubrimientos de acero inoxidable sobre acero de bajo contenido de carbono homogéneo con comparado con otros procesos tal como es de aporte por polvos.



Se logró el control de espesores obteniendo parámetros de deposición lo cual permitirá realizar deposiciones de acuerdo a las necesidades de cada sustrato que se requiere recubrir.

REFERENCIAS.

1. J.R Davis & Associates. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004
2. Hanbook of termal spray technology. 1a edición. Vol. 6. ASM International. Metals Park. OH. USA, 2004.
3. Metals Handbook. 9a edición. Vol. 1. Properties and selection: Irons and steels. American society for metals. USA, 1985.
4. R. A. Lula. Stainless Steel. Carnes Publication Services, Ind. USA, 1993.
5. William D. Calliester Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Reverté, 5a reimpresión, Bracelona 2001.
6. Donald R. Askeland. La ciencia e ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1987
7. Combustion Wire Spray Gun, WIREJET-96 “Operating Mauual” 2009.
8. Thermal Spray Materials Guide, Sulzer Metco, Feb. 2006.
9. Science and Technology of Advanced Materials, IOP Publishing, January 2008.
10. http://www.sulzermetco.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1764/3384_read-5296/



AUTOMATION OF COMBUSTION POWDER THERMAL SPRAY PROCESS AND IMPROVEMENTS OF COATINGS OBTAINED.

E. Garduño^{1,2*}, J. M. Dorador González¹, A. Barba Pingarrón²

1.- Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

2.- Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Departamento de Materiales y Manufactura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510, México

egarduno@unam.mx,

dorador@unam.mx,

arbapin5@gmail.com

Abstract

This article shows the design sequence for the automation of combustion powder thermal spray process. With this process is possible obtain coatings of many different compositions with capabilities to achieve excellent corrosion and wear resistance. The elements obtained were validated using CAD modeling and 3D animation before their construction. A working prototype was produced using rapid prototyping techniques. Mechanical and electronic components were assembled together and adapted to a thermal spray gun attached to a robot arm that provided the necessary movements to generate combustion thermal spray coating process. Results produced with this automatic coating process are discussed.

1. Introduction

Thermal Spray technology is one of the deposition techniques used in Surface Engineering. This technique produce surface coating with different compositions, that could be metallic, ceramic or a combination of them. This kind of coatings can improve wear and corrosion resistance of parts and components.

Thermal spray process begins with the fusion of the materials that will be used for coating. This fusion is obtained with a diversity of energy sources, being one of them the combustion of gas mixtures of oxygen and acetylene in the inner part of a specially designed gun. The melted material is projected using an air or gas current that carry the melted particles and produces an impact with the target surface of the part. [1] [2]. The gun, usually is manipulated by a person that moves it continuously following a path.

The obtained coating with this conventional process can be porous and discontinuous in its thickness with low adherence. These imperfections produce a low-quality coating, but can be reduced using an automatic deposition system that could produce better adherence and uniformity and reduce porosity.

In order to obtain the integration of the automated combustion powder thermal spray process is important to consider the characteristics of this process, namely: The aperture of the valves for gases of the process, the activation of the ignition system of the gun, the movement of the trigger that allows the flow of the powder used for spraying. It is important, additionally, to consider that the weight of the components of the



system must be kept to a minimum in order to allow the use of a low capacity robot.

2. Design proposal

The design of the components necessary for the proposed system was based on the methodology given by Pugh [4]. This method includes the following stages in the design process:

- Detection of the Specifications
- Conceptual design
- Detailed design
- Manufacture

In order to achieve the automation of the combustion powder thermal spray system a conventional gun will be used, so that the first step in the design was to obtain its dimensional and volumetric characteristics together with its operational parameters. A CAD model of the gun is shown in Figure 1.

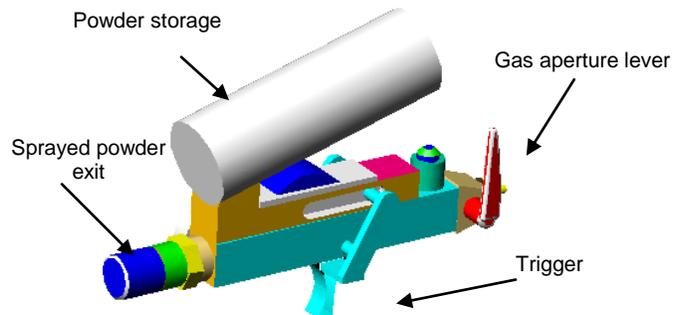


Fig 1: Spray gun, model 5PII, Sulzer Metco

3. Design of the mechanical components

The final design for supporting the spray gun and its container is shown in Figure 2. The support was built using 10 mm sheet of Aluminum 1100 AA. The holes are for the assembly of the cover, the gun and for allowing its attachment to a robot arm. This part was manufactured using a NC machine.

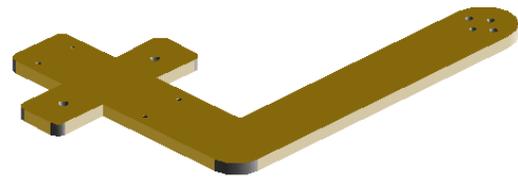


Fig 2: Support of the spray gun

The shutter system for moving the trigger of the spray gun was designed as shown in Figure 3.

The following table compares the advantages and disadvantages of the



use of one or other of the drives for the trigger.

ADVANTAGES	DISADVANTAGES
Magnetic field is superior and with this you get one force majeure in the drive trigger	It increases its volume and therefore the structure becomes larger.

Table 1. Advantages and Disadvantages of the Trigger

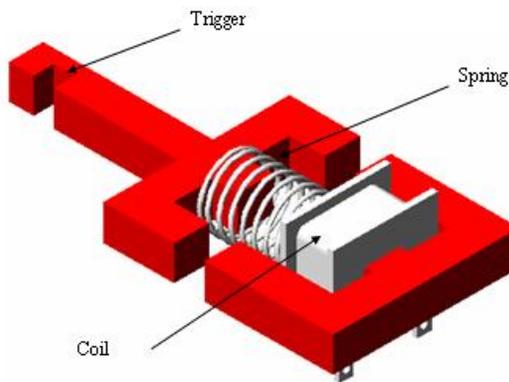


Fig 3: Shutter system for the trigger

In order to activate the trigger and protect its operation, housing is necessary. This housing is shown in Figure 4.

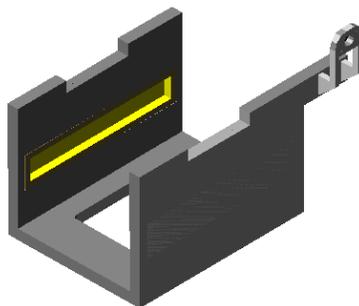


Fig.4: Housing for protection of the trigger.

The following table compares the advantages and disadvantages that we have to make one or other of the drives for the housing.

ADVANTAGES	DISADVANTAGES
<ul style="list-style-type: none"> - The use of less quantity of material to manufacture. - Remove the clamping assembly of the flange, that shows an excess weight and disassembly of the clamping muff for manual labor. 	<ul style="list-style-type: none"> - The structure becomes more fragile -If you need to use the gun sprayer in a craft it is necessary to invest in time for the placement of the aperture system of the gas valves

Table 2. Advantages and Disadvantages for the housing

Position switch-type sensors, were selected to carry out the ignition and shutdown process was necessary to have an element that one could choose at different points: the first for the opening of the gas, which serves for the lighting of the team, the second for the full implementation of the gas and the melt of the particles to be projected, and the third for the closure of the passage of the gas and shutdown of the computer.

Such a design in conjunction with the sensors were selected because of its

ease of positioning and easy control for operation when performing the work, supporting the force applied thereon effective to actuate the valve opening of gas.

A critical section of the equipment is the aperture system of the gas valves. In order to obtain this movement, a part was designed to apply the necessary force to the valve using a CD motor with sensors, for obtaining the positions of maximum and minimum apertures. This system is shown in Figure 5.

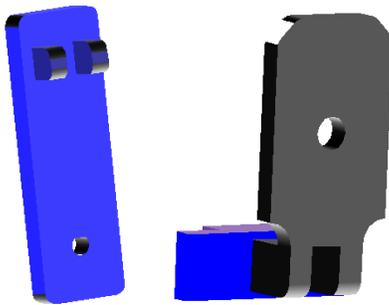


Fig 5: Parts for opening system of the gas valves.

The above mentioned parts were manufactured using a rapid prototyping system that allowed obtaining complex parts in ABS polymer, which is light and functional. The complete assembly of the system is shown in Figure 6.

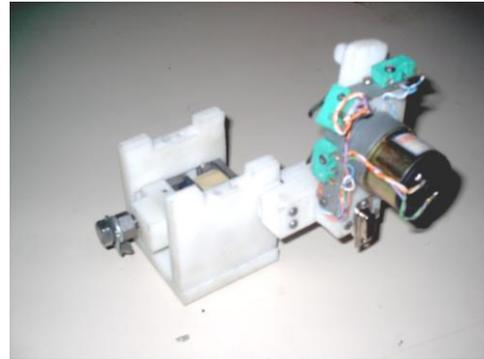


Fig 6: Assembly of the automation system for thermal spray gun.

The assembly of the automation system, the support and the spray gun is shown in Figure 7. Figures 8 and 9 show the system mounted in the robot arm.

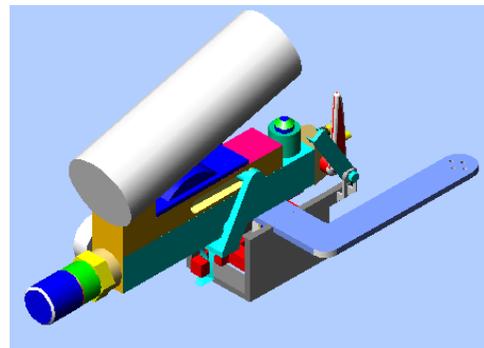


Fig 7: Spray gun with the automation system assembled.

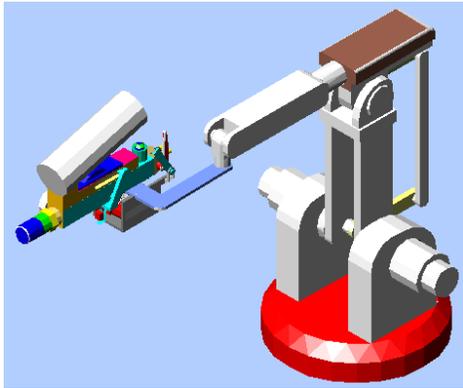


Fig 8: Robot arm with the automated combustion powder thermal spray gun attached.

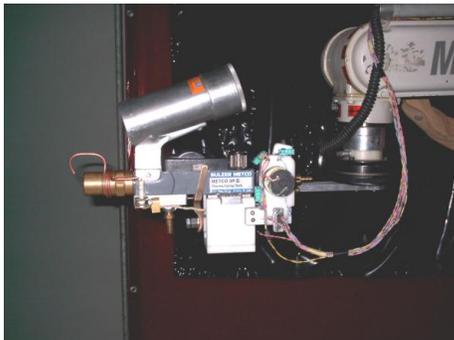


Fig 9: Prototype attached to the robot

4. Design of the electronic system

It is important to understand that to drive the switches were used curved plates, avoiding obstacles on way to or from the actuator arm with the gas valve to prevent malfunction of the automation.

The selection of the system actuators was made simultaneously with the design

of the mechanical components, in order to ensure an adequate mechatronics system.

For the aperture of the gas valves a geared CD motor was selected and mounted as shown in Figure 10.

For the activation of the trigger of the gun a solenoid was selected.

For obtaining the spark for starting the flame a commercial system used in stoves was selected.

In the system of control of the team had with outputs of 24 volts of direct current, insufficient to generate a necessary spark for ignition.

We selected a transformer formed by a solenoid which enables us to obtain 110 volts alternating current sufficient to generate a spark by means of a resistor coated on one end of the ceramic material to control current flow and prevent melting.

The system can be used both in automatic or manual mode. This idea was decided to allow testing and maintenance of the individual systems.

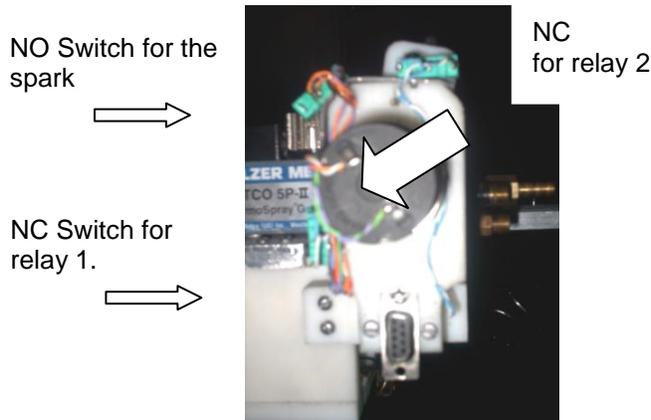


Fig 10: Geared motor coupling to the housing of the automation system.

The circuit was placed inside a box that will be used for controlling all the components of the system. Figure 11 shows the position of the buttons and switches

The recommendation is that this box should be placed to one side of the control of the MOTOMAN system.

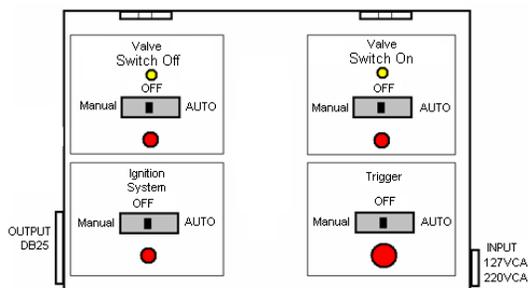


Fig 11: Control Box distribution

The control box was designed as an element of support for the operation of the equipment. This distribution allows the thermal projection process totally automated, semiautomated or manual, depending on the needs of the application or complexity of the pieces.

The wiring diagram for the circuit and its connections is shown in Figure 11.

5. Experimental Evaluation of coatings

The automatic system was tested using a powder named as 12C, whose main characteristics are: (a) hardness 30-35 Rc, recommended for high wear and corrosion resistance. Its melting point is between 1010 and 1065 °C. Composition of the powder include a combination of Ni-Cr-Fe-B-Si [11] Sulzer Metco Type 5P-II Thermospray Gun “ Instructions”.

Parts to be coated of 1018 carbon steel were prepared with a cleaning step using a trichlorethylene solution and after were preheated for ten minutes using the flame of the gun at a distance of 10 cm.

For thermal spraying at a rate of 150 cm / min were measured layer thickness at different points using Philips XL20 SEM. As can be observed in Figure 12, the thickness at a peak of the layer is 1.19 mm.

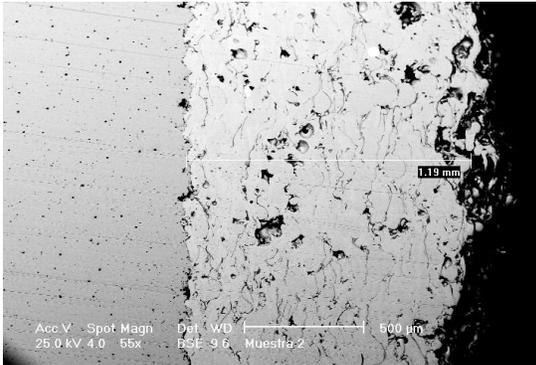


Figure 12. BSE image of coating of NiCrFeBSi obtained by flame thermal spray on AISI 1018 carbon steel. Thickness of 1.19 mm of the layer. SEM.

They were sprayed thermal with different times of projection, with the parameters of the previous test for a speed of 150 cm/min. The thickness of the layer obtained was measured and the results are shown in Table 3 and Figure 13.

Layer thickness mm	Projection time sec
0	0
0.8	60
1.3	120
2.2	180
3.2 (Rise of the layer)	280

Table 3. Ratio of coating thickness vs flame thermal spray projection time

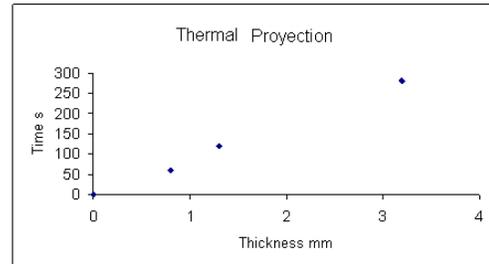


Figure 13. Graph of Ratio of coating thickness vs flame thermal spray projection time

Tests were carried out for determining the better path for the spraying of the surface. The desired coating thickness was between 1.0 and 1.2 mm.

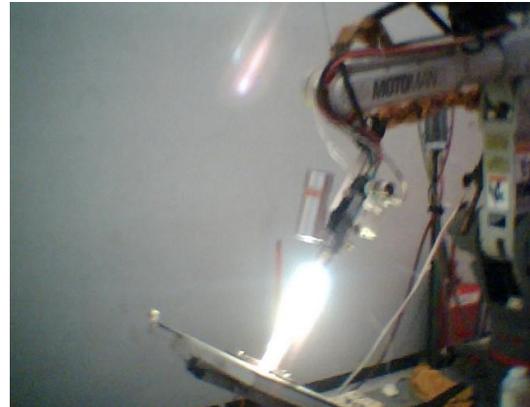


Fig 14: Image of the automated combustion powder thermal spraying process.(ACPTSP) operating.

The experimentally obtained equation for determining the coating thickness is:

$$Y = 0.81 + 0.16X$$



Where Y is the thickness and X the application time of thermal spray process.

Figures 15 shows a micrograph of a Ni-Cr-Fe-B-Si coating obtained with a manual combustion powder thermal spray and figures 16 and 17 show photos obtained with automated system and observed with a Philips XL20 scanning electron microscope (SEM) of the coated surfaces. Its clear that the use of the automated system increase the adherence and reduce the porosity of the coating.

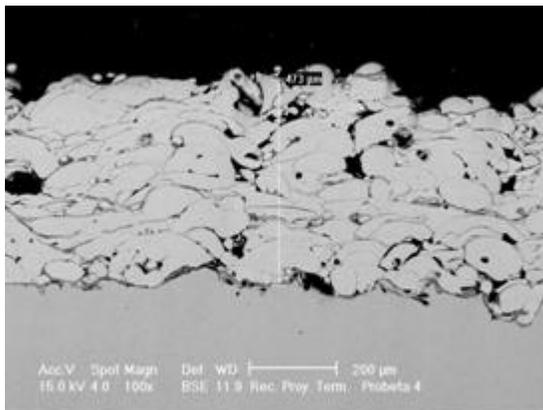


Figure 15: SEM Micrograph of a Ni-Cr-Fe-B-Si coating obtained by a conventional manual combustion powder thermal spray process. Its possible to observe limited adherence and high porosity.

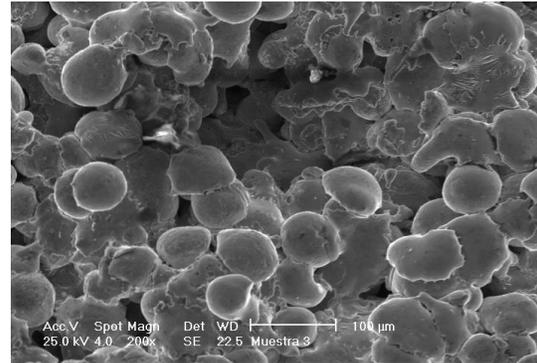


Fig16: SE Micrograph showing the structure and morphology of the coated surface obtained with ACPTSP.SEM 200 X.

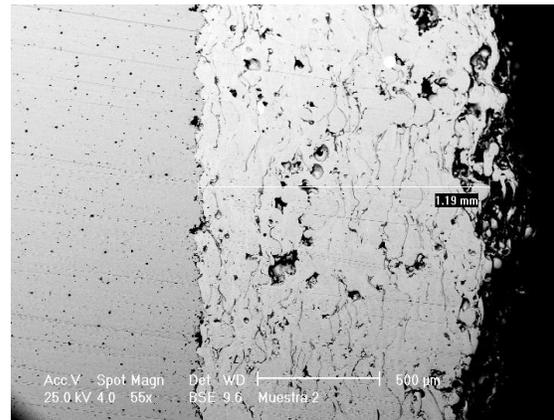


Fig 17: BSE Micrograph of the Ni-Cr-Fe-B-Si coating showing better uniformity of thickness and reduced porosity of the coated surface obtained with ACPTSP. SEM 55X



6. Conclusions

Results obtained with the automatic system were compared with coatings obtained in a conventional way. The continuity and adherence of the coated surfaces was better than the obtained with the manual process and the porosity was reduced. All the material was perfectly coated to the parts, fulfilling the objectives stated at the beginning of the research.

Thanks to the automation of the systems of the combustion powder thermal spray process can now be considered as a real alternative for high quality coating systems. This automatic process represents a real alternative for industrial products that have a short life in use. Besides, coating is a process that can be used for rehabilitation of components allowing their reutilization.

Acknowledgements

Thanks to the projects PAPIIT IN115809 and IT102612 DGAPA UNAM.

References

- [1] Iguczi and H Knozinger, 1935, Metal clusters in catalysis. Ed. BC Gates.
- [2] Sydney H. Avner, 1979, Introducción a la metalurgia física. 2nd Edition. Mc Graw Hill.
- [3] Richard L. Little, 1980, La tecnología en el trabajo de los metales. Mc Graw Hill.
- [4] Pugh, S., 1990, Total design, Ed. Addison Wesley Publishing Company, Great Britain.
- [5] Lawrence E. Doyle. 1988. Procesos y materiales de manufactura para ingeniería. Prentice – Hall Hispanoamericana S.A.
- [6] J.R Davis & Associates. 2004. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA
- [7] Lech Pawloski. 1995. The science and engineering of thermal spray coatings. British Library Catalogue. England.
- [8] Groover, Mikell P. 1997. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall 1a Edición, México.
- [9] William D. Callister Jr. 2001. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Reverté, 5a reimpression, Barcelona.
- [10] Donald R. Askeland. 1987. Ciencia e ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamérica, México.
- [11] Sulzer Metco. 1995. Type 5P-II Thermospray Gun “Instructions”.
- [12] Sulzer Metco. 1995. 12C Powder. “Specifications”.
- [13] Metals Handbook, vol. 18, American Society of Metals, Cleveland, OH, 1992, pp. 829–833.



[14] Herman H, Sampath S. In: Stern KH, editor. 1996. Thermal spray coatings, metallurgical and ceramic protective coatings. London, UK:

Chapman & Hall; p. 261–289.

[15] K. Holmberg, A. Matthews, 1994. Coatings Tribology, Elsevier, Amsterdam.

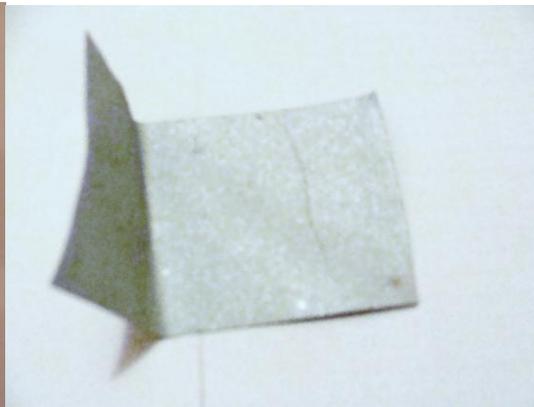
[16] Otsubo F, Era H, Kishitake K. 2000. “Structure and phases in nickel-base self-fluxing alloy coating containing high chromium and boron”. J. Therm. Spray Techn. 9 (1) 107 – 113.

[17] B.A. Kushner, E.R. Novinski, Thermal Spray Coatings, ASM, 2002.

RECUBRIMIENTOS GENERADOS SOBRE DIFERENTES SUSTRATOS MEDIANTE DIFERENTES TÉCNICAS DE PROYECCIÓN TÉRMICA



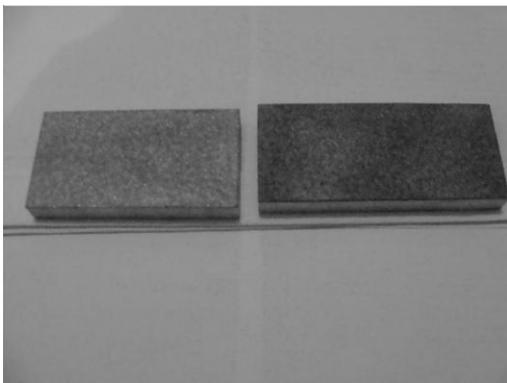
Sustrato polímero con recubrimiento de zinc con técnica alambre



Sustrato papel con recubrimiento de aluminio con técnica alambre



Sustrato acero con recubrimiento zinc con técnica alambre



Sustrato aluminio con recubrimiento CrNiBSiFe con técnica polvo



Sustrato bronce con recubrimiento CrNiBSiFe con técnica polvo



Bibliografía

1. Lech Pawloski. The science and engineering of thermal spray coatings. Wiley. England, 2008.
2. J. Fernández, J.M. Gilemany, M. Gaona. CPT Centro de Proyección Térmica. Departamento de Ingeniería Química y Metalúrgica. Biomecánica, 13 (1), 2005, pp. 16-39.
3. Sulzer metco 12C " Specifics" 1995.
4. Groover, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall 3a Edición, México, 2007.
5. J. Hernández, J. Arboleda Scientia et Technica Año XIII, No 36, Septiembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
6. R. Vijande, J.M. Cuetos Revista de Metalurgia, 2002. 45 (2)
7. J.R Davis & Associates. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004
8. Rodríguez, M.A., M. Staia, M. and Gil, L. (2002). Microstructural changes of a nickel based HVOF coating post heat treated. Surface Engineering, 18 (5); pp. 358-362.
9. Gérard Barbezat. Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1990 – 1993
10. H Liang , B. Shi , A. Fairchild, T. Cale, Applications of plasma coatings in artificial joints: an overview. Vacuum, 73, (3-4) (2004) 317
11. Klaus Stahlmann Sulzer Technical Review 2012 pp. 28 94th year of the STR ISSN 1660-9042
12. Klaus Stahlmann Sulzer Technical Review 2013 pp. 29 95th year of the STR ISSN 1660-9042
13. H. E. Friedrich y B. L. Mordike, Magnesium Technology, Metallurgy, Design Data, Applications, Springer Berlin, Alemania, 2006, pp. 499-631.



-
- 14.A. Yfantis, I. Paloumpa, D. Schemeiber y D. Yfantis, Surf. Coat. Technol. 151 152 (2002) 400-404.
 - 15.J. Zhang, Y. Wang, R. Zeng y W. Huang, Mater. Sci. Forum 546–549 (2007) 529-532.
 - 16.M. Campo, M. D. Escalera, B. Torres, J. Rams y A. Ureña, Rev. Metal. Madrid 43 (2007) 359-369.
 - 17.A. Pardo, S. Feliu Jr, M. C. Merino, M. Mohedano, P. Casajús, R. Arrabal Journal: Revista de Metalurgia ISSN/EISSN: 00348570 19884222 Year: 2010 Volume: 46 Issue: 2 Pages: 129-142
 - 18.S. Suresh, A. Mortenson y A. Needlman, Fundamentals of metal matrix composites, Publisher: Butterwort-Heinemann, EE. UU., 1993, pp. 139-191.
 - 19.H. R. Hafizpour y A. Simchi, Powder Metall. 51 (2008) 217-223.
 - 20.D.M. Aylor and D. Taylor, ASM Handbook: Corrosion of metal-matrix composites, Vol. 13 A, ASM International, Materials Park, OH, EE. UU., 1978, pp. 525-542.
 - 21.M. S. Bin Selamat, Adv. Perfom. Mater. 3 (1996) 183-204.
 - 22.Pugh Stuart. Total desing. Ed. Adisson – Wesley Publishing Company, Great Britain, 1990.
 - 23.Francisco Aguayo González, Víctor M Soltero S. Metodología del diseño industrial. 2003 Alfaomega.
 - 24.Manual de entrenamiento para el operador capítulo I y II. Equipo brazo mecánico (MOTOMAN) 2001.
 - 25.Boletín SIN 0188-7297, Publicación Técnica No. 202, Sanfandila Qro, 2002, Sector Comunicaciones y Transportes.
 26. William D. Calliester Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Reverté, 5a reimpresión, Bracelona 2001.
 27. Donald R. Askeland. La ciencia e ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 2007



-
28. Francisco Martínez Pérez. La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento. Editorial Limusa, México,1996.
 29. Sangines Franchini María. Desgaste de Metales. Editorial Limusa, México,1990
 30. T.S Eyre. Treasures on materials science and technology VOL 13 . Academic press Inc.
 31. Budinski, J.G "Needs and applications measurement and monitoring of wear" Journal of testing and evaluation", JTVA, VOL 25, No.2 March 1997.
 32. G99- 90 standar tests method for wear testing with pin o disk , Anual ASTM publication 2001.
 33. M.P Andres. "Desgaste mecánico : aspectos metalúrgicos y modo de acción en engranes y piezas de automóvil" Revista Metal CENIM VOL 17,1981
 34. Sulzer metco Type 5P-II Thermospray Gun " Instructions" 1995.
 35. Garduño E., Padilla S. Tesis "Estudio comparativo de niquelado químico, niquelado químico compuesto con adición de partículas duras de óxidos de cromo y fullerenos" 2008.
 36. Bharat Bhushan, B.K. Gupta, Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments, McGraw-Hill, New York, 1991.
 - 37.R.C. Tucker, ASM Handbook: Surface Engineering, Vol. 5, ASM International, Materials Park, OH, 1994,
 38. Heimann Robert B. Plasma-spray coatings. Weinheim, Germany: VCH, 1996.
 39. Wang H, Xia W, Jin Y. A study on abrasive resistance of Ni based coatings with a WC hard phase. Wear 1996;195:47–52.
 40. Franch R, Lorenzana C, Miguel JM, Guilemany JM. Recubrimientos Cermet/NiCrBSi resistencias al desgaste obtenidos por proyección térmica de alta velocidad (HVOF). Soldadura y tecnologías de unión 2001;67:9–14 in Spanish.
 41. Grainger S, Blunt J. Engineering coatings, design and applications. Cambridge, UK: Abington Publishing, 1995.



-
42. Hutchings IM. Tribology friction and wear of engineering materials. UK: Edward Arnold, 1992. John Wiley & Sons, ISBN 0 471 95253 2, (1995).
 43. Guilemany, J.M. Franch, R. Lorenzana, C.1998 Powder Metallurgy World Congress. Granada.Vol4. ISBN 1 899072 09 8. UK. (1998).
 44. Hutchings I.M, "Tribology: friction and wear of engineering materials", Edward Arnold, London, 1992, ISBN: 0-340-56184-x.
 45. Guilemany, J.M., de Paco, J., Miguel, J.R, Llibre, J. "Obtention and development of blends of powder to obtain free-standing component produced by HVOF spray forming". Proceedings of the International Thermal Spray Conference'98. ISBN 0-87170-659-8. Nice. France.(1998).
 46. K. Holmberg, A. Matthews, Coatings Tribology, Elsevier, Amsterdam, 1994.
 47. ASTM G133-95, Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02, 2001.
 48. J. Rodríguez, A. Martín, J. Llorca, Modeling the effect of temperature on the wear resistance of metals reinforced with ceramic particles, Acta Mater. 48 (2000) 993-1003.
 49. D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Wiley, New York, 1991.
 50. J. Yuansheng, W. Hauadong, A.R. Nicoll, G. Barbezat, Antifriction Behaviour of Cr2O3-Coated Cylinder Liner and Mo-Coated Piston Ring
 - 51.G. Barbezat, S. Keller, K.H. Wegner, Rotaplasma application in the automotive industry. ITSC 95, Kobe, 1995 proceeding, pp. 9 - 13.
 52. V.D.N. Rao, D.M. Kabat, R. Rose, D.Y. Leong: Performance of plasma spray coated bore 4.6 L- V 8 aluminum block engines in dynamometer and fleet vehicle durability tests. SAE paper no. 970008.
 53. Proceedings SAE conference, Detroit, March 1997.
 54. Byrnes, M. Kramer, Proceedings NTSC, Boston, 1994, p. 39.
 55. V.D.N. Rao, D.M., H.A. Cikaneth, G. Wuest, Material systems for cylinder bore applications—plasma spray technology. SAE paper no. 970023. Proceedings SAE Conference, Detroit, March 1997.



-
56. G. Barbezat, J. Schmid, MTZ Mot.Tech. Z. 62 4 (2001) 314.
 57. G. Barbezat, Proceeding, ITSC 2003, Orlando, 2003, p. 139.
 58. E. Pape, M. Kro"ll, M. Gerhardy, ATZ Worldwide 104 (12/2002) 2.
 59. M. Winterkorn, P. Bohre, L. Spiegel, G. So"hlke, ATZ, 102 10 (2000) 832.
 60. Barraza Lorenzo, Combustibles y Combustión, Universidad de Antioquia, Medellín 1995.
 61. Framroze Rointan, Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies Properties and Applications, William Andrew Publishing, 2001
 62. Knotek Otto, Thermal spraying and detonation gun processes, en Handbook of Hard Coatings Depositions, Technologies Properties and Applications, Noyes Publications, Park Ridges New Jersey USA, 2001, Página 77 – 107.
 63. Y. Yahagi, Y. Nagasawa, S. Hotta, Y. Mizutani, SAE 861599 (1986) 103.
 64. J. Yuansheng, W. Hauadong, A.R. Nicoll, G. Barbezat, Antifriction Behaviour of Cr₂O₃-Coated Cylinder Liner and Mo-Coated Piston Ring for Adiabatic Diesel Engine at High Temperature, 2nd Plasma-Technik Symposium (Vol. 2), Lucerne, Switzerland, 1991, p. 305.
 65. J. Beczkowiak, Characterization and Selection of Powders for Thermal Spraying, 2nd Plasma-Technik-Symposium (Vol. 2), Lucerne, Switzerland, 1991, p. 323.
 66. E. Lugscheider, M. Loch, H. Eschnauer, Coated Powders—The Status Today, 2nd Plasma-Technik-Symposium (Vol. 2), Lucerne, Switzerland, 1991, p. 339.
 67. Fr.-W. Bach, T. Duda, Z. Babiak, P. Bohling, B. Formanek, Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference, Montreal, Quebec, Canada, 2000, p. 299.
 68. M. Buchmann, R. Gadow, A. Killinger, Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference, Montreal, Quebec, Canada, 2000, p. 303.



-
69. M.G. Jacko, Physical and chemical changes of organic disc pads in service, *Wear* 46 (1978) 163–175.
 70. J.M. Herring, Mechanism of Brake Fade in Organic Brake Pad Linings, *Society of Automotive Engineers Transaction*, Paper 670146, 1967.
 71. B.J. Briscoe, I. Ramirez, P.J. Tweedle, Friction of aramid fibre composites, in: *Proceedings of the International Conference on Disc Brakes for Commercial Vehicles*, London, The Institution of Mechanical Engineers, London, UK, 1988, pp. 15–29.
 72. A.E. Anderson, Friction and wear of automotive brakes, in: *ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology*, Vol. 18, ASM International, Materials Park, OH, 1992, pp. 569–577.
 73. T. Kato, A. Magario, Wear of aramid fibre reinforced brake pads: the role of aramid fibers, *STLE Tribol. Trans.* 37 (1994) 559–565.
 74. M.G. Jacko, W.M. Spurgeon, R.M. Rusnack, S.B. Catalano, Thermal Stability and Fade Characteristics of Friction Materials, *Society of Automotive Engineers Transaction*, Paper 680417, 1968.
 75. T.S. Eyre, friction and wear of cast irons, in: *ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology*, Vol. 18, ASM International, Materials Park, OH, 1992, pp. 695–701.
 76. R.C. Tucker, *ASM Handbook: Surface Engineering*, Vol. 5, ASM International, Materials Park, OH, 1994, pp. 497–509.
 77. H. Herman, *Thermal Spray Coatings, Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, Chapman & Hall, London, 1996, pp. 261–89.
 78. Bharat Bhushan, B.K. Gupta, *Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments*, McGraw-Hill, New York, 1991.
 79. J.B.C. Wu, J.E. Redman, Hardfacing with cobalt and nickel alloys, *Welding J.* 73 (1994) 63–68.
 80. H.S. Ingham, A.P. Shepard, *Flame Spray Handbook*, Metco, New York, 1965.
 81. Barber, J., Mellorn, B. G. & Wood, R. (2005). The development of sub-surface damage during high energy solid particle erosion of a thermally sparyed WC-Co-Cr coating. *Wear* 259; pp.125-134.



-
82. Bourithis, L. & Papadimitriou, G. (2005). Three body abrasion wear of low carbon steel modified surfaces». *Wear*, 258; pp. 1775-1786.
83. Celik, E., CULHA, O., Uyulgan, B., AK A Zem, N., Ozdemir, I. & Turkur A. (2005). Assesment of microstructural and mechanical properties of HVOF sprayed WC-based cermets coatings for a roller cylinder. *Surf. Coat. Technol*, 200; pp. 4320-4328.
84. CHen, H., XU, C., QU, J., Hutchings, I. M., Shipway, P. H. AND LIU, J. (2005). Microscale abrasive wear behavior of HVOF sprayed and laser remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings. *Wear* 258; pp. 333338.
85. González, R., Cadenas, M., Fernández, R., Cortizo, J. L. Y Rodríguez, E. (2007). Wear behavior of flame sprayed NiCrBSi coating remelting by flame or by laser. *Wear*, 262; pp. 301-307.
86. Grigorescu, I.C. , DI Rauso, C., Drija-Halouani, R., Lavelle, B., Di Giampaolo, R. & Lira, J. (1995). *Surf. Coat. Technol*, 76-77; pp. 494-501.
87. Guilemany, J.M., Miguel, J. M., Vizcaino, S. and Climent, F. (2001). Role of three-body abrasion wear in the sliding wear behavior of WC-Co coatings obtained by thermal spraying. *Surf. Coat. Technol*, 140; pp.141-146.
88. Khameneh, SH., Heydarzadeh, M., Hokamoto, K. & Eumura, M. (2006) Effect of heat treatment on wear behaviour of HVOF thermally sprayed WC-Co coatings. *Wear*, 260; pp.1203-1208.
89. Kim, J. H., BAIK, K. H., Seong, B. G. & Hwang, S. Y. (2006). Effects of post-spraying heat treatment on wear resistance of WC-Co nanocomposite coatings» *Materials Science and Engineering A*. (Article in press. doi:10.1016/j.msea.2006.02.320.).
90. Laul, K. & Dorfman, M. (2000). New Chromium Carbide Nickel-Chrome Materials for High Temperature Wear Applications. In *Proc. of International Thermal Spray Conference* Ed. C.C. Berndt, ASM International, Montreal, Canada, 561-566.
91. LI, Q., Song, G. M., Zhang, Y. Z.,(2003). Microstructure and dry sliding wear behavior of laser clad Nickel bases alloy coating with the addition of SiC. *Wear*, 254; pp. 222-229.
92. Rodríguez, M. A., Klisans, J., Bavaresco, L., Scagni, A., Arenas, F. (2001). Wear resistance oh HVOF Sparyed carbide coatings. In *Proc. Thermal Spay 2001: New Surface for a New Millennium* ASM International, ISBN:0871707373,2001, p. 106.
-



-
93. Rodríguez, M., Staia, M., Gil, L., (2000). Effect of heat treatment on properties of nickel hard surface alloy deposited by HVOF. *Surface Engineering*, 16 (5); pp. 415-420.
 94. Stoica, V., Ahmed, R. & Itsukaichi, T. (2005). Influence of heat treatment on the sliding wear of thermal spray cermet coating. *Surf. Coat. Technology* 199; pp. 7-21.
 95. YANG, Q., SENDA, T. & HIROSE, A. (2006). Sliding Behavior of WC-12%Co coatings at elevated temperatures. *Surf. Coat. Technol*, 200; pp. 4208-4212.
 96. Wu, P., Du, H. M., Chen, X. L., LI, Z. Q., (2004). Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings. *Wear*, 257; pp. 142-147.
 97. Herman H, Sampath S. In: Stern KH, editor. *Thermal spray coatings, metallurgical and ceramic protective coatings*. London, UK: Chapman & Hall; 1996. p. 261-89.
 98. Rosso M, Bennani A, Studies of new applications of Ni-based powders for hardfacing processes. *PM World Congress Thermal Spraying/Spray Forming*, 1998, p. 524-530.
 99. Otsubo F, Era H, Kishitake K. Structure and phases in nickel-base self-fluxing alloy coating containing high chromium and boron. *J. Therm. Spray Techn* 2000;9(1):107-13.
 100. Lebaili S, Hamar-thibault S. Equilibres liquide-solide dans le système Ni-B-Si dans la région riche en nickel. *Acta Metall* 1987;35(3):701-10 in French.
 101. Wang H, Xia W, Jin Y. A study on abrasive resistance of Ni based coatings with a WC hard phase. *Wear* 1996;195:47-52.
 102. Franch R, Lorenzana C, Miguel JM, Guilemany JM. Recubrimientos de Cermet/NiCrBSi resistencias al desgaste obtenidos por proyección térmica de alta velocidad (HVOF). *Soldadura y tecnologías de unión* 2001;67:9-14 in Spanish.
 103. Shieh Y, Wang J, Shih H, Wu S. Allowing and post-heat treatment of thermal sprayed coatings of self-fluxing alloys. *Surf. Coat. Techn* 1993;58:73-7.
 104. Betancourt-Dougherty LC, Smith RW. Effect of load and sliding speed on the wear behaviour of plasma sprayed TiC-NiCrBSi coatings. *Wear* 1998;217:147-54.
 105. Grainger S, Blunt J. *Engineering coatings, design and applications*. Cambridge, UK: Abington Publishing, 1995.
-



106. López Cantera E, Mellor BG. Fracture toughness and crack morphologies in eroded WC-Co-Cr thermally sprayed coatings. *Mater. Lett* 1998;37(4-5):201-10.
107. Jia K, Fisher TE. Abrasion resistance of nanostructured and conventional cemented carbides. *Wear* 1996;200:206-14.
108. Hutchings IM. Tribology friction and wear of engineering materials. UK: Edward Arnold, 1992.
109. Hauschmann L, Siegi J, Karlik J, Kunes I, Chraska P. Plasma sprayed coatings under cyclic contact pressure on a small area. In: Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, USA. 1992. p. 723-7.
110. Hartfield-Wunsch SE, Tung SC. The effect of microstructure on the wear behaviour of thermal spray coatings. In: Proceedings of the 7th National Spray Conference, Boston, MA. 1994. p. 19-24.
111. Martín, J. Rodríguez, J. E. Fernández y R. Vijande, *Wear* 251 (2001) 1.017-1.022.
112. R. Vijande, F.J. Belzunce, J.E. Fernández; M.C. Bécares y A. Rincón, *Wear* 148 (1995) 221-233.
113. C. Navas, R. Vijande, J.M. Cuetos, M.R. Fernández y J. Damborene *Surf. Coat. Technol.* 201(2006) 776-785.
114. G. Cano, N. Cinca, S. Dosta y J. M. Guillemany, *Rev. Metal. Madrid* 44 (2008) 197-205.
115. S. Schelz, N. Branland, D. Plessis, B. Minot y F. Guillet, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) 6.3846.388.
116. R. Krishnan, S. Dash, R. Kesavamoorthy, C. Babu Rao y A.K. Tyagi, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) 2.791-2.799.
117. J.M. Cuetos, E. Fernández, R. Vijande, A. Rincón y MC. Pérez, *Wear* 169 (1993) 173-179.
118. E. Fernández, J.M. Cuetos, R. Vijande y A. Rincón, *Tribol. Int.* 29 (1996) 477-485.
119. E. Fernández, M. Cadenas, J.M. Cuetos y J. Mateos, *Proc. of the Fourteenth Int. Conf.. on Surface Modification Technologies XIV (SMT 14)*, vol. 14, París, Francia,



- 2000, T.S. Sudarshan y M. Jeandin (Eds.), ASM International, London, Inglaterra, 2001, pp. 333-337.
120. D.F. Williams, ed., Definitions in Biomaterials: Proceedings of a Consensus Conference of the European Society for Biomaterials, Chester, England, 3-5 March 1986, Progress in Biomedical Engineering, Vol. 4. ISBN: 0444428585 Elsevier, Amsterdam, (1987).
121. J.B.Park, R.S.Lakes. Biomaterials-an introduction. 2nd edition, Plenum Press. New York, U.S.A.(1992).
122. G. A. Abraham, M. González, T. Cuadrado. La Ciencia y la Ingeniería de los Biomateriales, un desafío interdisciplinario. Ciencia Hoy, volumen 9 N°49.
123. Galletti, P.M., Brody, G.S., et al: Clinical applications of biomaterials. NIH Consensus Conference. The Journal of the American Medical Association JAMA, 249 (8): (1983) 1050.
124. S. Ramakrishna, J. Mayer, E. Wintermantel, K. W. Leong. Biomedical applications of polymercomposite materials: a review. Composites Science and Technology 61 (2001) 1189.
125. Milosevski,M., Milosevska, D., Spaseska, J.Bossert,J., Boccaccini, A.R. Preparación y propiedades de materiales cerámicos bioinertes en el sistema Al₂O₃-TiO₂-SiO₂. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 38 (6) (1998) 455.
126. W. Suchanek, M. Yoshimura. Processing and properties of hydroxyapatite-based biomaterials for use as hard tissue replacement implants. J.Mater Res. 13 (1998) 94.
127. T. V. Thamaraiselvi, S. Rajeswari. Biological Evaluation of Bioceramic Materials - A Review. Trends Biomater. Artif. Organs, Vol 18 (1) (2004) 9.
128. A. Bigi, G. Cojazzi, S. Panzavolta, A. Ripamonti,N. Roveri, M. Romanello, K. Noris Suarez, L. Moro. Chemical and structural characterization of the mineral phase from cortical and trabecular bone. J. Inor Biochem 68 (1997) 45.
129. J. F. Shackelford. Advanced Ceramics. Volume 1. Bioceramics. ISBN: 9056996126 Gordon and Breach Science Publishers. The Netherlands.(1999).



130. LeGeros, R.Z., LeGeros, J.P. Phosphate Minerals in Human Tissues. In: Phosphate Minerals. J.O Niagru and P.B. Moore.Eds., ISBN 0387127577.Springer Verlag, Berlin, Germany (1984) 351.
131. V. Nelea, C. Morosanu, M. Ilescu, I. N. Mihailescu. Hydroxyapatite thin films grown by pulsed laser deposition and radio-frequency magnetron sputtering: comparative study. Appl. Surf. Sci. 28 (2004) 346.
132. J. M Fernández-Pradas, L. Clèries, E. Martínez, G. Sardin, J. Esteve, J.L. Morenza. Influence of thickness on the properties of hydroxyapatite coatings deposited by KrF laser ablation. Biomaterials 22 (2001) 2171.
133. J. M. Guilemany, J. R Miguel. «La proyección térmica en la ingeniería de superficies: posibilidades y aplicaciones». Memoria de la Jornada de Recubrimientos y Tratamientos Superficiales de Aplicación en Moldes y Matrices. ASCAMM. (Barcelona, 26 junio 1997).
134. R. B. Heimann. Plasma-Spray Coating, Principles and Applications. VCH Publishers, Inc. ISBN: 3527-29430-9. NY, USA (1996).
135. L. Sun, C. C. Berndt, A. Kucuk, R S. Lima, K.A. Khor. Surface Characterization Of Plasma Sprayed Hydroxyapatite Coatings. 24th Annual Cocoa Beach Meeting Proceeding, Am. Ceram Soc., Westerville, OH (2000).
136. V. V. Sobolev, J. M. Guilemany, J. Nutting, High Velocity Oxyfuel Spraying. Theory, Structure Property Relationships and Applications. Maney. ISBN 1-902653-72-6. Leeds (UK) 2004.
137. J. D. Haman, K. K. Chittur, D. E. Crawmer, L. C. Lucas. Analytical and mechanical testing of high velocity oxy-fuel thermal sprayed and plasma sprayed calcium phosphate coatings, J. Biomed. Mat. Res. 48 (1999) 856.
138. E. Garduño, A. Barba, Diseño de elementos para la automatización del proceso de proyección térmica por flama. Memorias SOMIM 2006.
139. E. Garduño, J. Dorador, A. Barba, Design for the automation of combustion powder thermal spray process. Memorias Congreso Internacional de Mecatrónica 2006.
140. E. Garduño, A. Barba, Caracterización del recubrimiento Cr-Ni-Fe-Si-B sobre aceros al carbono, generado mediante el proceso de proyección térmica automatizado. Memorias SOMIM 2008.



141. E. Garduño, A. Barba, Caracterización del proceso de rociado térmico de acero inoxidable sobre aceros de bajo contenido de carbono. Memoria SOMIM 2010.
142. E. Garduño, A. Barba, Automation of combustion powder thermal spray process and improvements of coatings obtained. The Journal of Applied Research & Technology (JART) 2013.
143. [http://www. disagroup.com](http://www.disagroup.com)
144. [http://www.sciencedirect.com/engineering tribology/Publication.](http://www.sciencedirect.com/engineering_tribology/Publication)
145. [http://www.tesisenxarxa.net/tesis_ub/available/0517107-h0032//00mgb_previo.pdf.](http://www.tesisenxarxa.net/tesis_ub/available/0517107-h0032//00mgb_previo.pdf)
146. <http://inasmet.es>
147. www.tycoelectronics.com
148. <http://sulzer.com>
149. www.matweb.com
150. <http://www.medtronic.com>
151. <http://www.biometeurope.com/>
152. <http://www.airproducts.com/>
153. <http://www.advanced-coating.com>

