



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIGALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
EN METALURGIA Y MATERIALES

**ESTUDIO DE LA ADHESIÓN Y DESGASTE DEL RECUBRIMIENTO
APLICADO POR ROCIADO TÉRMICO SOBRE UNA FUNDICIÓN GRIS**

Tesis para optar el grado de:
Maestro en Metalurgia y Ciencias de los Materiales

Presenta:

Ing. Leonel Caballero Tena
Ingeniero Mecánico, FIM, UMSNH, Enero 2012

Asesor:

Dr. Cuauhtémoc Maldonado Zepeda
Profesor e investigador Titular "C",
Departamento de Soldadura

Co-asesor:

Dr. Arnoldo Bedolla Jacuinde
Profesor e Investigador Titular "C",
Departamento de Fundición

Morelia, Michoacán, México. Febrero 2015



Of. Núm. IIM-ST-061-2014.

Morelia, Mich., diciembre 2 del 2014.

**C. ING. CABALLERO TENA LEONEL
P R E S E N T E**

Por medio de la presente, esta dirección del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tiene a bien informarle que para presentar su examen de grado de Maestría en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, con la tesis titulada **"ESTUDIO DE LA ADHESION Y DESGASTE DEL RECUBRIMIENTO APLICADO POR ROCIADO TERMICO SOBRE UNA FUNDICION GRIS"**, le ha sido asignado la siguiente mesa sinodal:

| | | |
|-----------|---------------------------------|--------------|
| 8900377-2 | DR. CUAUHTEMOC MALDONADO ZEPEDA | (Presidente) |
| 0100306-2 | DR. ARNOLDO BEDOLLA JACUINDE | (Vocal) |
| 0500269-9 | DR. VICTOR HUGO LOPEZ MORELOS | (Vocal) |
| 7700254-7 | DR. GERARDO BARRERA CARDIEL | (Vocal) |
| 0200161-6 | DR. CARLOS ALBERTO LEON PATIÑO | (Vocal) |
| 0200033-4 | DR. ARIOSTO MEDINA FLORES | (Suplente) |

Agradeciendo de antemano las atenciones que se sirvan prestar a la presente, aprovecho para enviarle un cordial saludo U. M. S. N. H.

ATENTAMENTE



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES

DR. CARLOS ALBERTO LEON PATIÑO
DIRECTOR
INST. DE INVEST. EN METALURGIA Y MATERIALES

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvan para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra manera incentivaron y ayudaron al desarrollo y culminación de este trabajo.

A mis padres por su apoyo incondicional y la confianza depositada en mí tanto en la búsqueda de este objetivo como en cada uno de los propuestos en mi vida.

Quiero agradecer de manera especial a mi asesor el Dr. Cuauhtémoc Maldonado Zepeda, por su invaluable apoyo, motivación y confianza para el desarrollo de este trabajo. A mi co-asesor el Dr. Arnoldo Bedolla Jacuinde por su apoyo y compartir conmigo su conocimiento.

A mi comité tutorial: Dr. Carlos León Patiño, Dr. Gerardo Barrera Cardiel y Dr. Víctor Hugo López Morelos, por sus valiosas aportaciones a este trabajo y la motivación generada para hacer de este un mejor trabajo.

A mis compañeros del departamento de Soldadura por apoyarme a lo largo de este proyecto. Así como a mis compañeros en general de IIM por brindarme su amistad, confianza y formar parte de esta tan importante etapa de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido para el desarrollo de este trabajo de investigación; ya que sin este no habría sido posible llevarlo a cabo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por brindarme la oportunidad una vez más de continuar con mis estudios y mi superación profesional.

Al Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, por todo el conocimiento recibido y apoyo brindado durante el desarrollo del programa de maestría.

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| ÍNDICE DE FIGURAS | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | vi |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| CAPÍTULO I..... | 3 |
| 1.1 Introducción | 3 |
| 1.2 Justificación | 4 |
| 1.3 Hipótesis | 4 |
| 1.4 Objetivos..... | 5 |
| 1.4.1 Objetivo General. | 5 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos..... | 5 |
| CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 6 |
| Revisión y discusión del estado del arte. | 6 |
| 2.1 Fundición gris. | 6 |
| 2.1.1 Problemas del recubrimiento de una fundición gris..... | 6 |
| 2.1.2 Propiedades de desgaste de una fundición gris | 7 |
| 2.2 Mecanismos de adhesión | 8 |
| 2.3 Rociado térmico | 10 |
| 2.3.1 Grupo I: Combustión..... | 12 |
| 2.3.2 Grupo II: Eléctrico | 15 |
| 2.3.3 Aplicaciones de los recubrimientos por rociado térmico | 16 |
| 2.4 Selección de la aleación | 19 |
| 2.5 Mecanismos físicos de desgaste | 19 |
| 2.5.1 Desgaste por abrasión..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 2.5.2 Desgaste por adherencia..... | 21 |
| 2.5.3Desgaste por fatiga..... | 21 |
| 2.6 Variables con mayor impacto sobre la adhesión del recubrimiento proyectado. | 22 |
| 2.7 Efecto del espesor del recubrimiento sobre el metal base | 22 |
| 2.8 Comportamiento al desgaste de recubrimientos por rociado térmico..... | 28 |
| 2.9 Factores que influyen sobre la fuerza de adhesión. | 29 |
| CAPITULO III | 33 |
| DESARROLLO EXPERIMENTAL | 33 |
| 3.1 Materiales..... | 34 |
| 3.1.1 Metal base | 34 |
| 3.1.2 Recubrimiento. | 35 |
| 3.2 Caracterización mecánica y metalúrgica de la fundición gris y los polvos | 37 |
| 3.3 Equipo..... | 38 |
| 3.4 Variables del proceso..... | 40 |
| 3.5 Aplicación de los recubrimientos | 42 |
| 3.6 Ensayo de corte..... | 44 |
| 3.7 Ensayo de desgaste | 46 |
| CAPÍTULO IV | 50 |
| 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 50 |
| 4.1 Análisis microestructural | 50 |
| 4.1.1 Micrografías de la fundición gris | 50 |
| 4.1.2 Caracterización de los recubrimientos | 51 |
| 4.1.3 Caracterización microestructural de la interfaz..... | 57 |
| 4.2 Análisis químico de la fundición gris | 59 |
| 4.3 Análisis de los polvos por difracción de rayos X | 59 |

| | |
|---|----|
| 4.4 Análisis de los polvos por fluorescencia de rayos X | 61 |
| 4.5 Ensayo de tensión | 62 |
| 4.6 Ensayo de corte | 64 |
| 4.6.1 Ensayo de corte para recubrimiento MetaCeram 21032S | 65 |
| 4.6.2 Ensayo de corte para recubrimiento MetaCeram 23065S | 67 |
| 4.6.3 Comparativa del ensayo de corte entre ambos recubrimientos | 69 |
| 4.7 Ensayo de dureza | 70 |
| 4.8 Ensayo de desgaste | 71 |
| 4.8.1 Ensayo de desgaste para la fundición gris..... | 71 |
| 4.8.2 Ensayo de desgaste para el recubrimiento MetaCeram 21032S | 73 |
| 4.8.3 Ensayo de desgaste para el recubrimiento MetaCeram 23065..... | 76 |
| 4.8.4 Comparativa del ensayo de desgaste entre ambos recubrimientos | 79 |
| CONCLUSIONES..... | 80 |
| APÉNDICE | 82 |
| REFERENCIAS | 84 |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Transición de desgaste ultraligero a severo en una fundición gris | 8 |
| Figura 2.2. Mecanismos de adhesión. | 9 |
| Figura 2.3. Proceso de rociado térmico..... | 11 |
| Figura 2.4. Representación del desgaste por abrasión (a,b) y erosión. | 20 |
| Figura 2.5. Representación esquemática del desgaste por fatiga. | 21 |
| Figura 2.6. Distribución de esfuerzos para distintos espesores del recubrimiento, 0.254, 0.762, 1.143 y 1.524mm. | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.7. Valores máximos y mínimos de la fuerza de adhesión para diferentes espesores del recubrimiento..... | 25 |
| Figura 2.8. Efecto del espesor sobre la fuerza de adhesión con un recubrimiento WC-Co y la influencia de la rugosidad..... | 25 |
| Figura 2.9. Tensión superficial como función del espesor del recubrimiento..... | 26 |
| Figura 2.10. Esfuerzos por temple y enfriamiento en función del espesor del recubrimiento, con enfriamiento forzado..... | 27 |
| Figura 2.11. Esfuerzos por temple y enfriamiento en función del espesor del recubrimiento, sin enfriamiento forzado..... | 28 |
| Figura 2.12. Esfuerzo principal contra espesor del recubrimiento a T amb y 200 °C | 32 |

CAPÍTULO III

| | |
|--|----|
| Figura 3.1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental..... | 33 |
| Figura 3.2. Elaboración de la fundición con molde de arena | 34 |
| Figura 3.3. Probetas maquinadas..... | 35 |
| Figura 3.4. Presentación de los polvos MetaCeram | 36 |
| Figura 3.5. Probeta de tensión bajo la norma ASTM E8-04. | 37 |
| Figura 3.6. Equipo de rociado térmico por flama TeroDyn 2000. | 38 |
| Figura 3.7. Equipo para montaje de probetas para recubrimiento..... | 41 |
| Figura 3.8. Arreglo para la aplicación del recubrimiento..... | 42 |
| Figura 3.9. Dimensiones de probeta para ensayo de adhesión. | 44 |
| Figura 3.10. Configuración utilizada para la realización del maquinado de probetas recubiertas con polvos MetaCeram 23065. | 45 |
| Figura 3.11. Bloque de acero para ensayo de corte..... | 45 |
| Figura 3.12. Probeta maquinada para ensayo de corte. | 46 |
| Figura 3.13. Esquema de un sistema de ensayo de desgaste “perno en anillo”. | 46 |
| Figura 3.14. Maquina utilizada, tipo “perno en anillo”..... | 47 |
| Figura 3.15. Contracara de acero M2 tratado térmicamente. | 47 |
| Figura 3.16. Dimensiones para probeta de desgaste..... | 48 |

CAPÍTULO IV

| | |
|--|----|
| Figura 4.1. Micrografías a) Sin ataque b) Con ataque nital 2% | 50 |
| Figura 4.2. Partículas Metaceram 21032S..... | 51 |
| Figura 4.3. Micrografías del recubrimiento 21032S a) 200X b) 500X. | 52 |
| Figura 4.4. EDS de la aleación 21032S..... | 53 |
| Figura 4.5. Microfisuras en la aleación 21032S | 54 |
| Figura 4.6. Morfología de las partículas de la aleación 23065..... | 54 |
| Figura 4.7. Micrografías del recubrimiento 23065 a) 500X b) 1000X | 55 |
| Figura 4.8. EDS de la aleación 23065 | 56 |
| Figura 4.9. Carburos con forma hexagonal | 57 |
| Figura 4.10. EDS realizado a uno de los carburos hexagonales..... | 57 |
| Figura 4.11. Micrografías del recubrimiento 23065 a) 50X b) 200X | 58 |
| Figura 4.12. Resultado del mapeo a la aleación 21032S | 58 |
| Figura 4.13. Micrografías del recubrimiento 23065 a) 200X b) 500X | 58 |
| Figura 4.14. Resultado del mapeo lineal a la aleación 23065 | 59 |
| Figura 4.15. Difractograma de la aleación MetaCeram 21032S | 60 |
| Figura 4.16. Difractograma de la aleación MetaCeram 23065 | 61 |
| Figura 4.17. Probetas para ensayo de tensión. | 63 |
| Figura 4.18. Gráfica esfuerzo - deformación de la fundición gris..... | 63 |
| Figura 4.19. Probetas para ensayo de corte a) MetaCeram 21032S b) MetaCeram 23065. | 64 |
| Figura 4.20. Ensamble entre el bloque de acero 9840 y las probetas recubiertas. | 65 |
| Figura 4.21. Gráfica de resultados del ensayo de corte del recubrimiento MetaCeram 21032S | 66 |
| Figura 4.22. a) Probeta 31, b) Probeta 7..... | 67 |
| Figura 4.23. Gráfica de resultados del ensayo de corte, recubrimiento MetaCeram 23065 | 68 |
| Figura 4.24. a) Probeta 20, b) Probeta 40..... | 69 |
| Figura 4.25. Gráfica de resultados del ensayo de desgaste, Fundición. | 72 |
| Figura 4.26. Grafica del coeficiente de fricción de las probetas de fundición gris sin recubrimiento A, B y C (52.6, 103.5 y 154.4 N respectivamente)..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.27. Gráfica de resultados del ensayo de desgaste del recubrimiento MetaCeram 21032S | 74 |
| Figura 4.28. Probeta 28 a) Antes del desgaste b) Después del desgaste | 75 |
| Figura 4.29. Grafica del coeficiente de fricción de las probetas 29, 28 y 33 (52.6, 103.5 y 154.4 N respectivamente) | 76 |
| Figura 4.30. Gráfica de resultados del ensayo de desgaste del recubrimiento MetaCeram 21032S | 77 |
| Figura 4.31. Probeta 48 a) Antes del desgaste b) Después del desgaste | 78 |
| Figura 4.32. Grafica del coeficiente de fricción de las probetas 9, 50 y 45 (52.6, 103.5 y 154.4 N respectivamente) | 78 |
| Figura 4.33. a) MetaCeram 21032S, b) MetaCeram 23065 | 79 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla I. Composición química nominal de una fundición gris. | 34 |
| Tabla II. Propiedades según la ASTM A48 para las clases de Fundiciones Grises | 34 |
| Tabla III. Dimensiones de las probetas para el ensayo de tensión de sección reducida. | 38 |
| Tabla IV. Parámetros de operación | 40 |
| Tabla V. Composición química de la aleación 210332S | 53 |
| Tabla VI. Composición química de la aleación | 56 |
| Tabla VII. Composición química de la fundición gris. | 59 |
| Tabla VIII. Composición química de las aleaciones..... | 62 |
| Tabla IX. Resultados obtenidos del ensayo de tensión de la fundición elaborada..... | 63 |
| Tabla X. Resultados del ensayo de corte, recubrimiento MetaCeram 21032S | 65 |
| Tabla XI. Resultados del ensayo de corte del recubrimiento MetaCeram 23065. | 68 |
| Tabla XII. Resultados del ensayo de dureza | 70 |
| Tabla XIII. Resultados del ensayo de desgaste, Fundición gris | 72 |
| Tabla XIV. Resultados del ensayo de desgaste, MetaCeram 21032S | 74 |
| Tabla XV. Resultados del ensayo de desgaste, MetaCeram 23065..... | 76 |

RESUMEN

En el presente trabajo, se estudió el grado de adherencia existente entre una fundición gris y dos diferentes recubrimiento base níquel, así como la influencia que tiene el espesor de dicho recubrimiento sobre el nivel de adherencia conseguido y sus propiedades al desgaste en seco. Como recubrimiento se seleccionaron dos diferentes tipos de aleaciones base níquel, aplicados por la técnica de rociado térmico por flama a una fundición gris como material base.

Se aplicó el recubrimiento a 36 probetas con geometría cilíndrica. De las cuales la mitad fueron recubiertas con una aleación en polvo Metaceram 21032S y la otra mitad con aleación en polvo MetaCeram 23065. Aleaciones provistas por la compañía Eutectic+Castolin.

Para medir el grado de adherencia, se realizó un ensayo de corte a 18 probetas. Tres ensayos bajo las mismas condiciones a cada uno de los espesores a estudiar, 1, 2 y 3 mm; de igual manera se hizo para ambos recubrimientos.

Para el ensayo de desgaste se prepararon 21 probetas con una sección transversal cuadrada de 1 x 1 cm, obtenidas de una barra cilíndrica a la que se aplicó el recubrimiento. Las cargas bajo las cuales se realizó el ensayo de desgaste fueron 52.6, 103.5 y 154.4N; en una máquina para desgaste en seco *pin-on-ring*. La distancia del ensayo fue de 5000 m.

El grado de adherencia resultó ser suficientemente bueno para los dos sistemas estudiados, ya que según los valores obtenidos en el ensayo de corte, al incrementar el espesor no se pierde adherencia. Además en el ensayo de desgaste en todas las pruebas, todas las probetas se mantuvieron íntegras sin presentar desprendimiento de material excesivo o descascaramiento.

De los resultados obtenidos, se observa una clara tendencia al desgaste del recubrimiento a medida que se incrementa la carga aplicada; sin embargo, el espesor del recubrimiento no es un factor que influya en la pérdida de material.

Las probetas con recubrimiento ensayadas, considerando ambos recubrimientos; presentan una tasa de desgaste mucho menor que las probetas sin recubrimiento. De esta manera, se comprueba así la viabilidad del uso de esta técnica de reparación.

Palabras clave: *rociado, térmico, flama, recubrimiento, níquel.*

ABSTRACT

This thesis studies the degree of adhesion between gray cast iron and two different nickel coatings as well as the influence of the thickness of the coating on the achieved level of adhesion and its wear properties. Selected coatings are two different types of nickel-based alloys, applied by flame thermal spray process on cast iron base material.

The coatings were applied to 36 cylindrical samples. Half of the samples were coated with an alloy powder MetaCeram 21032S and the other half with alloy powder alloys MetaCeram 23065. Alloys provided by the company Eutectic + Castolin.

To measure the degree of adhesion, 18 specimens were shear tested. Three tests under the same conditions for each of the thicknesses to be studied, 1, 2 and 3 mm. The same testing procedure was applied to both coatings.

For the wear test, 21 specimens were prepared with a square cross section of 1 x 1 cm, obtained from a cylindrical rod to which the coating was applied. The loads under which the wear test was conducted were 52.6, 103.5 and 154.4N; using a *pin-on-ring* wear machine. The testing distance was 5000 m.

The degree of adhesion was found good enough for both systems. According to the values obtained in the shear test with increasing thickness, adhesion is not lost. Also in all wear test, specimens were do not show excessive material removal or peeling.

From the results obtained, there is a clear trend in the wear of the coating as applied load increases; It is conclude that coating thickness is not a factor influencing the loss of material.

The coated tested specimens, in both coatings, have a lower wear rate than uncoated specimens. Thus, the feasibility of using this repair technique is possible.

Key words: *thermal spray, flame, coating, nickel.*

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

En la actualidad México se considera un país en vías de desarrollo industrial. Se encuentra frente a un mundo donde sólo los fabricantes más eficientes pueden llegar a sobrevivir y es por eso que el buscar la optimización de las operaciones de fabricación o reparación se convierte en una de las principales prioridades de cualquier industria.

Producir, buscando siempre la optimización en el empleo de los recursos con el propósito de minimizar el costo de las operaciones y maximizar el rendimiento de la maquinaria; sin embargo, es de lo más común encontrarnos con patios de desecho llenos de chatarra, piezas desgastadas u obsoletas que han terminado su vida útil sin desarrollar la función específica para la cual fueron diseñadas.

Es así como nos encontramos ante uno de los problemas más grandes que enfrenta la industria no sólo en México, sino a nivel mundial, que es el desgaste. El cual se encarga de retirar de servicio las piezas de manera prematura.

El establecer opciones para combatir el desgaste mediante análisis tecno-económicos que nos permitan de una manera costeable recuperar piezas desgastadas, utilizando eficientemente los recursos productivos; constituyen el reto del ingeniero en la industria actual. Es necesario acabar con la creencia errónea de que resulta más económico el intercambio de piezas desgastadas por otras nuevas en lugar de recuperarlas.

Se plantea entonces como una solución al problema, la aplicación de recubrimientos por el método de rociado térmico. Siendo esta técnica la más adecuada para la recuperación dimensional de piezas con un desgaste de hasta 3mm.

La propuesta en este trabajo es la implementación de recubrimientos con aleaciones base níquel con diferentes composiciones químicas. Estudiando la influencia existente entre el espesor de dicho recubrimiento y la resistencia de adherencia; así como las repercusiones existentes entre el espesor y las propiedades al desgaste del recubrimiento.

1.2 Justificación

En la actualidad hay muchos productos metálicos desgastados que pueden ser recuperados, y buscando una forma de resolver este problema se han ideado nuevas y mejores formas de reciclar productos desgastados, ya que en muchas ocasiones es más económico que fabricar una pieza nueva.

El rociado térmico ha sido usado tradicionalmente en la reconstrucción de componentes y en la reparación de partes desgastadas. Incontables componentes son normalmente recuperados, como ejes, pistones, rotores y válvulas de bombas, asientos de rodamientos, asiento de válvulas, tubos de calderas, cilindros de máquina de papel, turbinas, entre otros.

El presente trabajo de investigación examina el efecto de las variables operativas del proceso de rociado térmico sobre la recuperación dimensional de piezas con forma cilíndrica, debido a la gran cantidad de piezas existentes en la industria con esta forma, como lo son flechas, ejes, rodillos, discos, entre otras piezas.

En este caso, el trabajo de investigación se enfoca en resolver el problema de recuperación dimensional de piezas cilíndricas con un desgaste de 1 a 3mm, obtener información sobre el efecto de las propiedades mecánicas del recargue y la vida útil de las piezas reparadas que en ocasiones puede ser corta.

Usando el rociado térmico por flama se darán propuestas basadas en aspectos metalúrgicos que coadyuven a la recuperación, prolongación de la vida útil de las piezas cilíndricas y reducción de costos de la reparación.

1.3 Hipótesis

Al aplicar un recubrimiento por rociado térmico con polvos que contengan elementos con un punto de fusión elevado se tendrán partículas parcialmente fundidas; es decir, con dos fases, incrementando la fuerza de adhesión entre el sustrato y el material de aporte.

Mediante una adecuada preparación del metal base, se producirá una ligera interdifusión de elementos químicos o la formación de compuestos que modifican las propiedades mecánicas del recubrimiento, favoreciendo su fuerza de adhesión. La resistencia al desgaste en seco no se verá afectada por el espesor del recubrimiento.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General.

Estudiar el efecto de los parámetros del proceso de rociado térmico por flama sobre la adhesión entre el sustrato y el material de aporte, metalurgia de la interfaz y zonas adyacentes a la misma, así como la influencia en las propiedades del recubrimiento comercial base níquel sobre la fundición gris.

1.4.2 Objetivos Específicos.

1. Conocer la influencia de las variables del proceso sobre la recuperación dimensional de la pieza, como son la temperatura de aplicación y precalentamiento, velocidad de rotación de la pieza a recubrir, flujo de polvo, distancia de aplicación del recubrimiento, presión de aire.
2. Investigar el efecto de los parámetros del proceso sobre la resistencia de adhesión entre el recubrimiento y el metal base. Determinando cuales son los mecanismos que favorecen la adhesión.
3. Conocer el efecto del proceso de rociado térmico sobre la composición química y propiedades mecánicas del recubrimiento.
4. Obtener información sobre los mecanismos de resistencia al desgaste en seco del recubrimiento. Haciendo énfasis en la distancia recorrida de la pieza sometida al desgaste, carga y velocidad sobre el desgaste del recubrimiento.
5. Obtener información sobre los mecanismos que permiten garantizar una buena adhesión, recuperación dimensional y propiedades metalúrgicas adecuadas que garanticen el recubrimiento por una distancia recorrida en un intervalo de tiempo bajo condiciones de trabajo específicas.

CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Revisión y discusión del estado del arte.

En esta sección se tratarán de exponer algunas investigaciones que tienen un carácter relevante en la aplicación de recubrimientos por el proceso de rociado térmico, sus principales variantes y el efecto en particular producido en una fundición gris.

2.1 Fundición gris.

La fundición gris es uno de los materiales ferrosos más utilizados, debido a que es barato y de fácil obtención. Es llamada así por el color que presenta cuando fractura. Las características del hierro fundido incluyen la combinación de buenas propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y fricción, y procesos de manufactura económicos. La excelente resistencia al desgaste de la fundición gris durante un deslizamiento en seco en condiciones de baja carga se atribuye a la alimentación de la superficie de contacto por escamas de grafito y a la formación de una película de grafito sobre la superficie de contacto [2].

2.1.1 Problemas del recubrimiento de una fundición gris

El recubrimiento de una fundición gris se puede hacer mediante un recargue por soldadura; sin embargo, las fundiciones de hierro presentan un problema que afecta considerablemente su soldabilidad, dicho problema es atribuido a la gran cantidad de carbono que poseen. Los procesos de fabricación aplicados a este material, así como los tratamientos térmicos, pueden producir microestructuras útiles en la mayoría de los casos; sin embargo, el ciclo térmico inherente a la soldadura, generalmente, produce microestructuras no deseables.

El material adyacente al depósito de soldadura posee una tasa de enfriamiento de la zona afectada térmicamente que en algunos casos puede llegar a ser demasiado rápida, esto depende tanto del tipo de proceso usado como la alta temperatura que conlleva el mismo. Existe además la tendencia a la formación de martensita en la zona fundida, así como la posible formación de carburos, los cual poseen un alto contenido de carbono ubicándose en la zona afectada térmicamente, debido al mismo ciclo térmico. Ambas microestructuras son muy frágiles y por lo tanto son susceptibles al agrietamiento, ya sea durante la aplicación misma de la soldadura o después de la aplicación. La severidad o cantidad de este

agrietamiento depende directamente del tipo de fundición, las condiciones de soldadura y el tratamiento térmico post soldadura [3].

Para aumentar la soldabilidad de una fundición gris, es necesario hacer un precalentamiento y también es conveniente realizar un postcalentamiento a manera de relevado de esfuerzos. Un precalentamiento reduce la velocidad de enfriamiento, que aumenta el tiempo de permanencia a una temperatura mayor, que a su vez coadyuva a la difusión del carbono. El rango de precalentamiento más usual está entre 300 y 600 °C [4]. Según Kumar, una temperatura de precalentamiento de 540 °C será requerida para obtener una reducción significativa de la dureza en la zona de fusión y la zona afectada térmicamente, y con ello reducir la posibilidad de agrietamiento. Sin embargo, para mejorar la maquinabilidad también será necesario un tratamiento de postsoldadura [2, 3]. Esto es aplicable cuando se utilizan electrodos de bajo contenido de carbono.

Los electrodos base níquel, son el tipo de electrodos que representan una mayor resistencia a la formación de grietas debido a sus propiedades mecánicas deseables y su capacidad de precipitar al carbón como grafito [4].

2.1.2 Propiedades de desgaste de una fundición gris

Raiahi y Alpas [2] han estudiado la resistencia al desgaste por deslizamiento de una fundición gris tipo AISI A30 contra un acero 52100 se midió dentro de un rango de carga de 0.3 a 50.0 N, y un rango de velocidad de deslizamiento de 0.2 a 3.0 m/s con una máquina de desgaste bloque en anillo. Se midieron las tasas de desgaste y las temperaturas de la superficie como una función de las condiciones de carga. Se realizó un mapeo de desgaste, construido para resumir las tasas de desgaste medidas y los mecanismos que controlan los niveles de desgaste.

En el mapeo, fueron identificados regímenes de desgaste ultra ligero, ligero y severo. En el régimen de desgaste ultra ligero, las tasas de desgaste fueron 8×10^{-7} y 9×10^{-7} mm³/m en 0.3 N de 0.2 y 0.5 m/s, respectivamente. Las superficies en contacto fueron cubiertas por capas de óxido de hierro compactadas. En el régimen de desgaste ligero, las tasas de desgaste estaban en el rango de 10^{-5} mm³/m en condiciones de baja carga, y 10^{-4} mm³/m en condiciones de alta carga. La aparición de un desgaste severo coincidió con transferencia de material local a la superficie de contacto de acero, lo que aumentó la rugosidad de la

superficie de contacto. Las tasas de desgaste en el régimen de desgaste severo fue de tres órdenes de magnitud más altas (por ejemplo, 10^{-1} y $3.2 \times 10^{-1} \text{ mm}^3/\text{m}$) en comparación con las del régimen ligero [2]. La figura 2.1 muestra la transición de desgaste en una fundición gris.

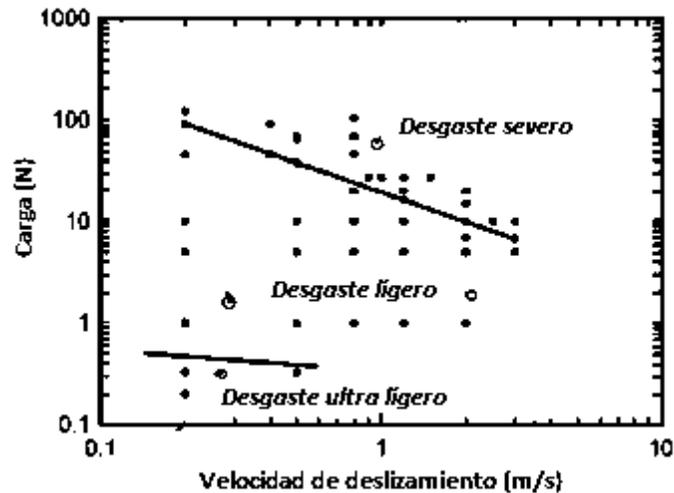


Figura 2.1. Transición de desgaste ultraligero a severo en una fundición gris [2]

2.2 Mecanismos de adhesión

La fuerza de adhesión en los recubrimientos es una propiedad muy importante, un revestimiento nunca protegerá a un sustrato si no se adhiere a ella [5].

Existen tres diferentes mecanismos de adhesión entre el recubrimiento y el sustrato por el proceso de rociado térmico, agarre mecánico, enlace físico y enlace químico-metalúrgico o difusión[6, 7]. En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente los diferentes mecanismos de adhesión existentes.

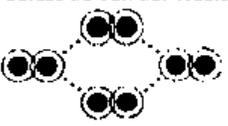
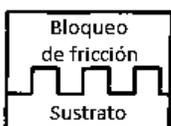
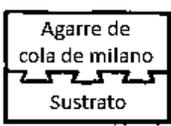
| Agarre mecánico | Enlace físico | Enlace químico |
|---|---|--|
|  <p>Aumento de área superficial Sustrato</p> | <p>Fuerzas de Van der Waals</p>  | <p>Enlaces iónicos</p>  |
|  <p>Bloqueo de fricción Sustrato</p> | <p>Puente de hidrógeno</p>  | <p>Enlace covalente</p>  |
|  <p>Agarre de cola de milano Sustrato</p> | | <p>Enlace metálico</p>  |

Figura 2.2. Mecanismos de adhesión.

Para un proceso de rociado convencional donde la velocidad es relativamente baja, la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato se da básicamente por agarre mecánico, que a su vez está relacionado con la rugosidad de la superficie del sustrato y la solidificación de las gotas impactadas. Sin embargo, la adhesión por difusión de metales y aleaciones sólo se produce cuando la temperatura durante la aplicación del recubrimiento es suficientemente alta (los coeficientes de difusión varían como $\exp(-E_A/kT)$ donde E_A es la energía de activación, T la temperatura absoluta, y k la constante de Boltzmann) y no existe ninguna capa de óxido en la superficie [5].

Para que la difusión se produzca, la capa de óxido sobre el sustrato debe ser destruida con un arco transferido inverso en un vacío suave [8] y el sustrato se mantenido a una temperatura suficientemente alta. En un proceso de pulverización en frío, las primeras partículas que golpean la superficie no se adhieren inmediatamente, más bien existe un período de inducción durante el cual las partículas que impactan y deforman la superficie donde eliminan parcialmente la capa de óxido sobre la superficie del sustrato. Para que esto ocurra, la velocidad de las partículas debe ser mayor que una velocidad crítica.

La adhesión química requiere que la gotita impactada funda el sustrato y entonces exista un compuesto químico de ambos líquidos. Por ejemplo, una reacción química se produce también cuando una partículas de hierro impacta sobre un sustrato de aleación de aluminio

precalentado a más de 400 K, donde probablemente la delgada capa de alúmina se funde o erosiona y, como se ha observado [9], se forma una capa delgada FeAl_2O_4 entre la gota y el sustrato. Incluso si el sustrato no se funde en el impacto, la alta temperatura inducida en la capa de óxido de sustrato puede promover en gran medida la adherencia.

La adhesión por agarre mecánico tiene lugar cuando el sustrato presenta cierto grado de rugosidad. Las gotitas en la superficie se reducen mientras se enfría, y se adhieren a la superficie debido a la fuerza de fricción que se desarrolla [10]. Esta adhesión depende tanto de la amplitud de la rugosidad, a menudo caracterizada por la distancia entre el pico más alto y el más profundo corte sesgado y de la separación entre picos y valles.

La presencia de contaminantes adsorbidos sobre el sustrato también puede afectar a la fuerza de adherencia. En el impacto la partícula fundida, se evapora y condensa sobre el sustrato muy rápidamente (en unos pocos cientos de nanosegundos) elevando la presión bajo la partícula y la disminuyendo su contacto con el sustrato [11].

2.3 Rociado térmico

Esta técnica es conocida con el nombre de metalización, aludiendo al tipo de recubrimiento, que casi siempre es metálico. También es capaz de aplicar materiales cerámicos y/o polímeros sintéticos o cualquier combinación deseada, según las necesidades técnicas de la industria[12].

En este proceso, el material a aplicar es fundido a altas temperaturas y rociado a gran velocidad sobre la superficie de una pieza base o sustrato; esto para conferirle mejores propiedades físicas y químicas, aumentando su resistencia a los efectos del medio de trabajo al que es sometida y disminuyendo los costos de mantenimiento y reparación [12].

Generalmente la aplicación del recubrimiento térmico se hace a través de equipos automáticos, donde una extremidad robótica opera una pistola de rociado.

Los materiales de los revestimientos se ubican dentro de una cámara interna en la pistola, en forma de polvo, alambre o barra. Ahí por efecto de la combustión, el material se calienta a altas temperaturas convirtiéndose en micro partículas; estas, son rociadas sobre el sustrato por medio de una fuerte corriente de aire comprimido, inyectado a través de una manguera sellada hacia la cámara, ocasionando que un gran número de gotitas sean expulsadas a

velocidades extremas, que van desde los 185 hasta 340 m/s (dependiendo el tipo de rociado térmico) sobre la pieza, creando una estructura homogénea sobre la superficie con excelente tolerancia a la corrosión y/o el desgaste [12].

La figura 2.3 muestra esquemáticamente el proceso de rociado térmico. Sin duda, la característica que hace especial esta técnica, es la extrema velocidad (energía cinética) que adquiere el rociado, logrando así que se ancle mecánicamente a las imperfecciones del sustrato, resultando una macro estructura cohesiva conocida como lenticular o laminar.

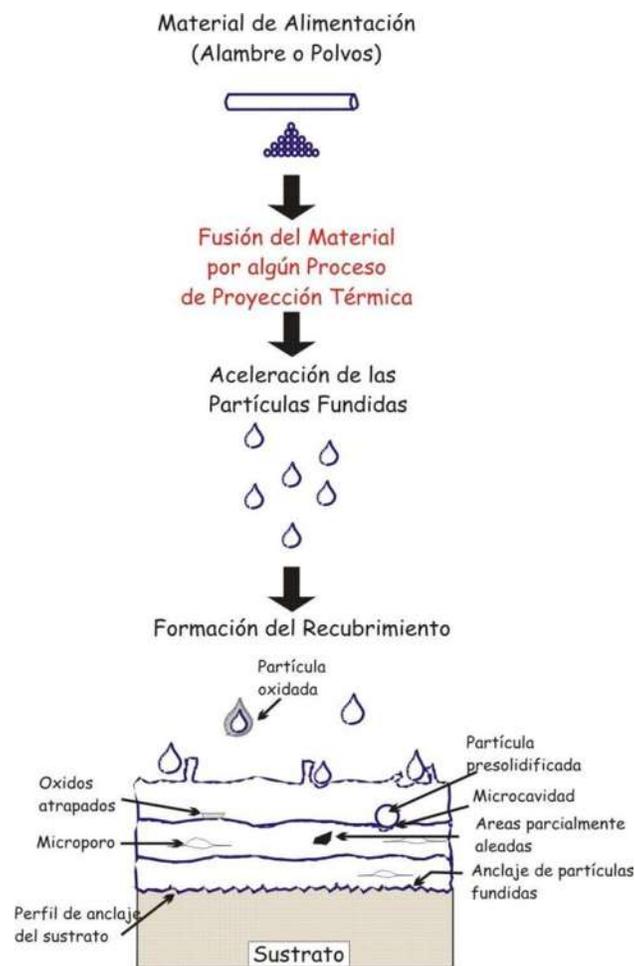


Figura 2.3. Proceso de rociado térmico [1].

Cabe decir, que a mayor velocidad y despliegue de energía cinética es mayor la adherencia de las capas rociadas [12].

Antes de proyectar al sustrato, éste debe limpiarse para obtener una mejor adherencia del revestimiento, pues el mecanismo de cohesión es el anclaje mecánico. También es indispensable definir el espesor de la capa que se desea obtener, teniendo en cuenta la composición del depósito y los requerimientos industriales de la pieza[12]. El proceso de rociado térmico puede ser dividido en dos grandes grupos de acuerdo al método de generación de calor [13].

2.3.1 Grupo I: Combustión

En este sistema se utilizan gases combustibles como fuente de combustión, puede utilizarse para aplicar una amplia variedad de materiales tales como alambres de metal, barras de cerámica y polvos metálicos y no metálicos. Existen variantes en el proceso de proyección por combustión, como lo son: proyección por llama, proyección de alta velocidad oxígeno/combustible y proyección por detonación [14].

La entrada de gas es axial y el polvo puede ser introducido axialmente o radialmente en la antorcha. Los alambres o varillas pueden ser usados en vez de polvos, siendo introducidos axialmente. Las partículas de material son fundidas en la llama y aceleradas en dirección al sustrato. La relación de la mezcla oxígeno - combustible puede variar en la franja de 1:1 a 1.1:1, resultando en una atmósfera carburante u oxidante, respectivamente. La temperatura de la llama varía de 2.700 a 3.100°C y la velocidad entre 80 a 100 m/s. La aleación en polvo se inyecta a temperatura ambiente, en donde la aleación micro pulverizada y la llama acetilénica tiene la misma trayectoria, lo que da origen a una transferencia de calor de llama a la partícula, por lo tanto, la partícula es calentada, elevando sucesivamente su temperatura. En algunos casos, la partícula permanecerá el tiempo suficiente en la llama, como para ser fundida [15].

Además de elevar el nivel de energía térmica de la partícula, dicha partícula es fuertemente acelerada por la expansión de los gases de combustión, por lo que también experimenta un

fuerte incremento en términos de energía cinética. Este haz de partículas semifundidas y fundidas que tienen altas velocidades, impactan sobre la superficie de la pieza ante lo cual las partículas se deforman, adaptándose a la rugosidad de la pieza que ha sido preparada y por lo tanto se anclan mecánicamente.

La eficiencia en la transferencia del calor de la llama a la partícula dependerá del tamaño y la forma de esta. Un tiempo demasiado largo implicará excesiva transferencia de calor, oxidando las partículas, las cuales serán depositadas en forma de óxidos, tanto el tamaño como la forma de la partícula son variables que pueden ser controladas mediante el proceso de fabricación adecuado y constituyen los parámetros más importantes que determinan la calidad de una aleación micro pulverizada.

La partícula debe tener un diámetro nominal preestablecido para el tipo de sistema que se va a usar. Para un sistema de alto poder calorífico una partícula de diámetro nominal inferior al requerido, implicará una excesiva transferencia de calor por unidad de área superficial, produciéndose oxidación por alta temperatura. A la inversa, partículas de diámetro nominal mayor al requerido no absorberán suficiente calor y no lograrán un estado pastoso, menos aún fundirse, impidiendo el anclaje mecánico. Para propósitos prácticos, las antorchas de alambre, varilla o tubo son similares. Las características y temperaturas de la llama dependen de la proporción oxígeno – gas combustible y de las respectivas presiones.

El proceso del rociado térmico de combustión por medio de polvos metálicos como materia prima, utiliza la mezcla de los polvos metálicos con una corriente de gas, que puede ser aire o un gas combustible. Esta corriente se alimenta en un inyector central, rodeado por un orificio anular. El orificio anular se alimenta con una mezcla combustible gas y oxígeno, que daría normalmente una llama en el soplete y el paso del polvo a través de la llama da lugar a la fusión de la mayor parte de las partículas [15].

El aire comprimido u otro gas son alimentados a través de orificios anulares que rodean los puertos del gas, con el objetivo de proyectar hacia el sustrato las partículas fundidas del polvo.

Proyección por llama (Flame Spraying). En proyecciones a llama, la materia prima se alimenta continuamente a la punta de la pistola donde se funde en una llama de gas y es propulsado al sustrato por una corriente de gas presurizado. Los gases de combustible comunes son el acetileno, el propano y el metil acetileno-propadieno (MAPP). El aire se utiliza normalmente como el gas de atomización. Las llamas oxiacetilénicas se utilizan extensivamente para proyección de alambre por llama por el grado de control y las altas temperaturas de estos gases. La llama se puede ajustar fácilmente para ser una llama oxidante, neutra o de reducción [13]. Existen dos diferentes procesos de rociado térmico, en una y dos etapas.

El proceso de rociado térmico en dos etapas (aspersión y fusión). El primer paso es la deposición por aspersión del polvo en el lugar, durante la aspersión, el polvo alcanza su temperatura de fusión, ablandándose y deformándose antes del impacto, pero el revestimiento aún permanece con un alto grado de vacíos interpartículas, un segundo paso es la fusión del revestimiento con llama, bobinas de inducción, hornos al vacío, entre otros, para densificar (Aumentar la densidad) el revestimiento eliminando la mayoría de los poros. El mojado y coalescencia son realizados a través de la fusión de los óxidos en el polvo y en la superficie del sustrato. La fusión es requerida como un postratamiento en el rociado térmico con la mayoría de las aleaciones duras autofusibles. Por otro lado, este proceso está limitado a la geometría de la pieza, debido esencialmente a la necesidad de producir una fusión superficial a una temperatura entre 950 y 1050 °C [15].

El proceso de rociado térmico en una etapa (aspersión-fusión). Este proceso consiste en la proyección y fusión simultánea de la aleación, esto se logra debido al reducido tamaño de la partícula. La pieza y/o área a recubrir deben ser pequeñas, estar precalentadas y la distancia boquilla-pieza deberá ser menor que en el proceso de dos etapas. Las capas fundidas son bastante densas, prácticamente exentas de poros. La dureza del revestimiento puede llegar a 65 HRC. Las temperaturas de fusión pueden, aún, alterar las propiedades

obtenidas por tratamiento térmico de algunas aleaciones. Los revestimientos autofusibles son ampliamente utilizados en aplicaciones de desgaste excesivo combinado con altas tensiones en la interface revestimiento/substrato (cizallado o impacto) [15].

Proyección de alta velocidad oxígeno/combustible (High Velocity Oxy/Fuel Spraying, HVOF). Este es uno de los más recientes métodos de proyección térmica, utiliza oxígeno y un gas combustible a alta presión. Los gases combustibles típicos son el propano, propileno y el hidrógeno. La mezcla de gas caliente se acelera a velocidades supersónicas, y la materia prima en polvo se inyecta en la llama. El proceso reduce el aporte térmico y maximiza la energía cinética de partículas para producir recubrimientos que son muy densos, con baja porosidad y alta adherencia. HVOF se ha utilizado ampliamente para aplicar revestimientos resistentes al desgaste [14].

Proyección por detonación. En este proceso, una mezcla de oxígeno, acetileno y el polvo alimentado son detonados por chispas en una cámara de pistola varias veces por segundo. El material de revestimiento se deposita a muy altas velocidades para producir recubrimientos muy densos. Las aplicaciones típicas incluyen el desgaste de revestimientos cerámicos resistentes para su uso a una alta temperatura [14].

2.3.2 Grupo II: Eléctrico

Proyección por arco. La proyección por arco eléctrico se hace sobre metales y aleaciones en forma de alambre y polvos contenidos en una varilla metálica. Dos alambres serán consumidos continuamente y fundidos por un arco producido entre ellos. El material fundido es atomizado y propulsado hacia el sustrato por un chorro de gas de alta velocidad, usualmente aire. La calidad y las propiedades de revestimiento pueden ser controladas mediante la variación de la presión de atomización, la forma de boquilla de aire, potencia, velocidad de alimentación de alambre, velocidad de desplazamiento, y la distancia de separación entre el sustrato y la boquilla. Los recubrimientos aplicados por rociado de arco muestran una excelente fuerza adhesiva y cohesiva [14].

Proyección por plasma. Este método es empleado para aplicar materiales que se funden a temperaturas muy altas. Se forma un arco entre un electrodo y la boquilla de pulverización, que actúa como el segundo electrodo; aquí el sustrato no es parte del circuito eléctrico. Se

hace pasar un gas inerte a presión entre los electrodos donde se calienta a temperaturas muy altas (17000°C) para formar un gas de plasma. El material en forma de polvo se introduce entonces en el gas calentado en el que se funde y es propulsado al sustrato a una velocidad alta. El proceso puede ser usado para aplicar materiales como barrera térmica, tales como óxido de circonio y alúmina, y recubrimientos resistentes al desgaste como óxido de cromo [14].

2.3.3 Aplicaciones de los recubrimientos por rociado térmico

La flexibilidad de los procesos de proyección térmica ofrece la posibilidad de aplicar casi cualquier material como recubrimiento sobre casi cualquier sustrato, lo cual genera una amplia gama de aplicaciones con sus respectivas propiedades, ya sea una sola o una combinación de estas propiedades.

Dichas propiedades y los materiales empleados frecuentemente para la elaboración de los diversos recubrimientos son:

- Antidesgaste.
- Aislamiento térmico.
- Resistencia a la corrosión.
- Recubrimientos deliberadamente desgastables y recubrimientos resistentes a la abrasión.
- Recubrimientos eléctricamente conductivos y recubrimientos eléctricamente resistivos/aislantes.
- Recubrimientos para la restauración dimensional.
- Recubrimientos para uso médico.
- Recubrimientos poliméricos.

Los recubrimientos antidesgaste. Han sido usados para enfrentar varios mecanismos de desgaste incluyendo la abrasión, la erosión o la cavitación. Un ejemplo de esto sería un recubrimiento antidesgaste de carburo aplicado con equipo HVOF sobre los bordes de una propela de barco para combatir los efectos de la cavitación, debido a que la proyección

térmica puede depositar materiales no convencionales, más de un factor de desgaste puede ser atacado por un solo recubrimiento, a partir de que varias propiedades físicas pueden ser integradas en dicho recubrimiento. Materiales antiadherentes y materiales con bajo coeficiente de fricción pueden ser combinados con recubrimientos de alta dureza. Materiales autolubricantes también pueden ser depositados. Las durezas de los recubrimientos pueden ser prediseñadas en el rango de 20 a 70 HRC. Los óxidos y los carburos son materiales antidesgaste comunes, teniendo a los óxidos de cromo y los cermetes de carburo de tungsteno-cobalto (WC/Co) como los 2 recubrimientos más comunes para éste fin.

Aislamiento térmico. Los recubrimientos para barreras térmicas están hechos usualmente de zirconia de baja conductividad térmica, los cuales se depositan para reducir la conducción de calor hacia el sustrato. Como ejemplo, una barrera térmica de zirconia estabilizada con itrio rociada con equipo de plasma para proteger un álabe de turbina. Estos recubrimientos también pueden reducir el calor perdido, los efectos térmicos transitorios, y la corrosión/oxidación a alta temperatura mediante el mantenimiento del sustrato a una temperatura inferior. Los procesos por proyección térmica pueden introducir al sustrato niveles controlados de porosidad y micro-agrietamiento, lo cual tiende a realzar la capacidad aislante del recubrimiento e incrementar su resistencia al choque térmico. El material más comúnmente usado para este fin es la zirconia parcialmente estabilizada.

Resistencia a la corrosión. La protección anticorrosiva es usualmente obtenida con materiales más nobles que el sustrato, cerámicos químicamente inertes o con polímeros, todos los cuales pueden ser proyectados térmicamente sobre partes expuestas en servicio a la corrosión atmosférica, ambiental, ácida o cáustica. Un ejemplo puede ser un elemento estructural de acero siendo recubierto mediante un equipo de arco eléctrico. La porosidad es muy nociva para esta clase de recubrimientos. Las porosidades interconectadas pueden estropear la función anticorrosiva del recubrimiento. Los recubrimientos obtenidos mediante procesos de proyección térmica de alta energía son especialmente adecuados para esta clase de aplicaciones debido a que exhiben una porosidad baja (usualmente menor a 1%) y poros aislados entre sí. Los materiales más comunes usados para la resistencia a la

corrosión incluyen al zinc, al aluminio puro, las aleaciones base níquel y las aleaciones cobre-níquel.

Recubrimientos para la restauración dimensional. La proyección térmica tuvo sus inicios en aplicaciones para restaurar las superficies desgastadas de ejes y rodillos. El hierro y el acero son los materiales típicamente empleados para realizar dichas restauraciones. Mediante el uso de técnicas de proyección térmica por arco eléctrico se pueden obtener recubrimientos de varios milímetros de espesor.

Una aplicación poco usual es la reparación de revestimientos para aeronaves usando aluminio puro proyectado mediante técnicas de arco de plasma. En la cual se rellenan rayones o abolladuras sobre la superficie de paneles o piezas estructurales. Estas simples pero efectivas técnicas de reparación evitan en muchas ocasiones el fuerte gasto e inversión de tiempo en desarmar estructuras o mecanismos para reemplazar componentes superficialmente dañados.

Recubrimientos para uso médico. Como ejemplo, una prótesis de cadera, cuyos sustratos están hechos con Ti-6Al-4V recubiertos con titanio de pureza comercial (CP-Ti) rociado mediante arco eléctrico protegido con argón. Los recubrimientos médicos se dividen en dos grandes categorías: bioactivos y biocompatibles. Ambos tipos de recubrimientos se usan en prótesis para implante. Para generar recubrimientos biocompatibles se emplea típicamente titanio poroso con la finalidad de recubrir aleaciones de titanio; el nuevo tejido óseo crece dentro de la porosidad del recubrimiento asegurando así el implante. Los recubrimientos bioactivos están hechos generalmente de algunas formas de fosfato de calcio, incluyendo el fosfato tricálcico y la hidroxiapatita. Esos recubrimientos emulan las características del hueso natural para que el nuevo tejido óseo crezca sobre la superficie y con el tiempo reabsorba el recubrimiento.

Ambos tipos de recubrimientos son pensados para acelerar la recuperación del paciente y extender el mayor tiempo posible la vida útil del implante. Los implantes dentales y otros dispositivos ortopédicos también son otra aplicación de esta clase de recubrimientos.

2.4 Selección de la aleación

La selección de la aleación se determina primeramente por el tipo de propiedad deseada y consideraciones de costos; sin embargo, otros factores tales como el metal base, proceso de rociado, requerimientos de impacto, corrosión, oxidación, desgaste, etc., son también a considerar [14, 16].

Una guía general para la selección de una aleación para recubrimientos superficiales por rociado térmico puede ser la siguiente:

1. Análisis de las condiciones de servicio, con el objeto de determinar el tipo de propiedad esperada y el medio de trabajo.
2. Selección preliminar de varias aleaciones candidatas.
3. Análisis de la compatibilidad de la aleación con el metal base, tomando en cuenta consideraciones de esfuerzos residuales y posibles fracturas.
4. Tipos de preparación superficial y medios para lograrlo.
5. Selección de la aleación óptima, considerando el aspecto económico y la vida útil.
6. Selección del proceso de rociado térmico, considerando la velocidad de deposición, cantidad de aleación requerida, eficiencia del proceso y costo total.

2.5 Mecanismos físicos de desgaste

Existen según la ASTM [17] muchos mecanismos de desgaste, limitada a cuatro tipos básicos: adhesión, abrasión, fatiga y oxidación. Estos mecanismos representativos sirven para ilustrar dos puntos de gran importancia:

- a) Existe más de un mecanismo de desgaste
- b) La sensibilidad en los parámetros, tales como carga, velocidad, distancia de deslizamiento, etc., puede ser diferente para situaciones específicas de desgaste.

Estos mecanismos se refieren al desgaste debido al movimiento relativo en el plano de contacto tangencial entre dos cuerpos sólidos. En el desgaste seco por deslizamiento, hay que tener presente que no existe entre las dos superficies un lubricante, sino sólo la presencia de aire con una cierta humedad.

2.5.1 Desgaste por abrasión

Es muy importante el estudio y análisis del desgaste que es provocado por partículas duras [17]. Este tipo de desgaste puede ser por abrasión o por erosión. En el desgaste abrasivo el material es eliminado de la superficie por protuberancias o por partículas duras. Existen diferentes términos para calificar la abrasión, puede ser desgaste entre dos cuerpos, desgaste entre tres cuerpos y erosión [18]. Una representación esquemática se muestra en la figura 2.4.

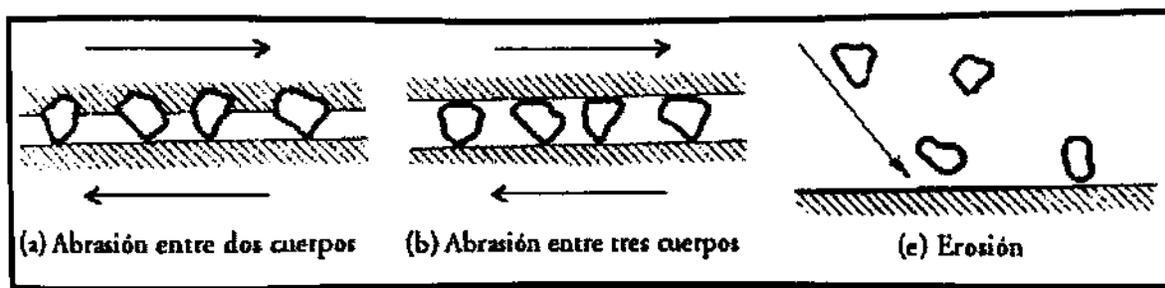


Figura 2.4. Representación del desgaste por abrasión (a,b) y erosión [18].

El desgaste entre dos cuerpos sucede cuando existen protuberancias en alguna de las superficies, mientras que en el de tres cuerpos, las partículas duras están libres para rodar y deslizarse entre dos superficies en deslizamiento mutuo.

Otra forma de calificar la abrasión, es como abrasión con bajo y alto esfuerzo. En la abrasión con alto esfuerzo se excede la fuerza necesaria para la trituración de la partícula abrasiva; por lo que se rompe durante el proceso de desgaste, mientras que en la abrasión por bajo esfuerzo no se rompe la partícula.

En algunas ocasiones el desgaste es causado por partículas que chocan contra la superficie, partículas que pueden ser arrastradas por un flujo ya sea líquido o gaseoso. Este tipo de desgaste es el conocido como desgaste por erosión. La velocidad de las partículas en este tipo de desgaste se encuentra entre 5 y 500 m/s.

La abrasión y la erosión pueden ser empleadas útilmente en diferentes procesos como lo son el pulido y corte de materiales; y aunque ambas formas presentan partículas de desgaste diferentes, el proceso resultante de desgaste es similar en ambos casos.

El desgaste abrasivo puede involucrar fractura frágil o deformación plástica. Bajo ciertas circunstancias puede existir solo flujo plástico, pero frecuentemente ocurren ambos; incluso en materiales idealmente frágiles.

2.5.2 Desgaste por adherencia

Sucedo cuando los picos superficiales fluyen plásticamente y forman fuertes uniones endurecidas por el trabajo, con el subsecuente movimiento se rompen y se tiene la pérdida del materia [18]. Para este desgaste, la severidad puede variar dependiendo de factores como la similitud de los materiales, la rugosidad de las superficies, la carga aplicada y la lubricación o grado de limpieza de las superficies. Generalmente cundo los materiales son similares y la superficie está muy limpia, mayor será el desgaste por este mecanismo. De igual manera, si la superficie se encuentra demasiado rugosa, el desgaste también será grande. Una carga normal grande puede originar la formación de capas de óxidos y la penetración del lubricante si es que este existe, por lo que el desgaste generalmente se incrementa con la carga. Un lubricante lo suficientemente viscoso con capacidad de separar las dos superficies, podrá disminuir considerablemente el desgaste.

2.5.3 Desgaste por fatiga

Ocurre cuando la superficie experimenta repetidos esfuerzos cíclicos en un punto dado, dando origen a la formación y crecimiento de una fisura hasta llegar al desprendimiento de un volumen determinado de material. La figura 2.5 muestra esquemáticamente este mecanismo de desgaste, en el tiempo t_1 , se forma la fisura, con el subsecuente movimiento se propaga (t_2); después de suficientes ciclos, la partícula se desprende de la superficie y origina el desgaste por la pérdida de material [18].

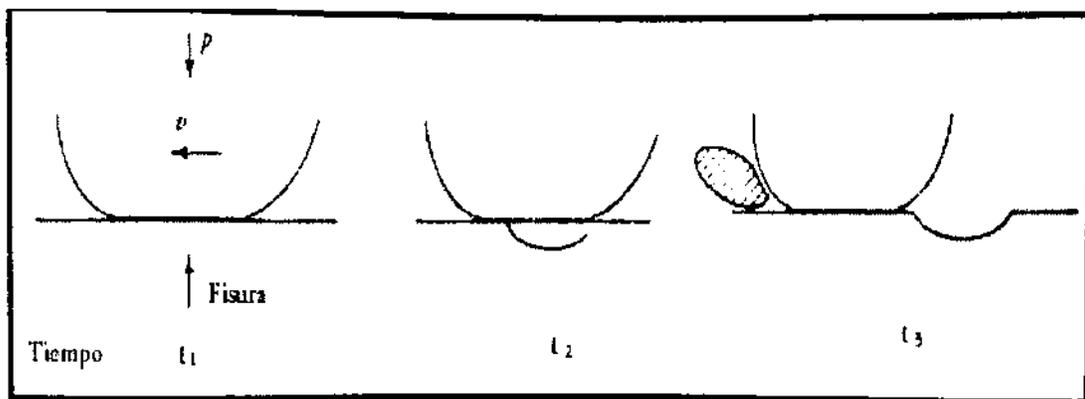


Figura 2.5. Representación esquemática del desgaste por fatiga [18].

2.6 Variables con mayor impacto sobre la adhesión del recubrimiento proyectado.

En un estudio realizado con un equipo comercial de la marca Castolin, de nombre Rototec 29220, se utilizó una aleación en polvo base aluminio que puede ser aplicada sin ningún recubrimiento de enlace y directamente sobre un sustrato preparado. Este tipo de recubrimiento es empleado como protección contra la corrosión del acero en contacto con agua salada. El tamaño de partícula presente en la aleación en polvo está en el rango de 71 a 150 μm . Como sustrato fue empleado acero estructural S235JR. El sustrato se preparó haciendo una limpieza con acetona, para posteriormente hacer incidir un chorro de arena sobre la superficie y finalmente ser limpiado con acetona nuevamente [19].

La rugosidad máxima de la superficie para revestimientos de proyección térmica gruesas no debe exceder de aproximadamente un tercio del espesor de recubrimiento. Como regla general, la rugosidad máxima de la superficie debe ser 25 μm mayor que la profundidad del perfil mínimo especificado [20].

De acuerdo con el análisis realizado sobre el efectos de los parámetros del rociado térmico sobre las propiedades medidas del recubrimiento; se puede concluir que el mayor impacto en la adhesión del recubrimiento proyectado es ejercido por el tasa de alimentación de polvo, después la distancia entre dos pasadas paralelas a la pieza de trabajo, luego la distancia de la pieza de trabajo hasta la boquilla de la pistola, y por último la velocidad de movimiento de la pieza de trabajo. Mientras que el impacto más pequeño viene dado por la presión de aire [19].

2.7 Efecto del espesor del recubrimiento sobre el metal base

El rociado térmico o metalizado se utilizan a menudo para proporcionar barreras térmicas en turbinas y motores de combustión interna, para reparar una máquina desgastada cara y piezas del motor. Estas aplicaciones requieren cierto grado de adherencia entre el recubrimiento y el sustrato. Aunque pudiera creerse que capas gruesas proporcionan una mayor vida útil, ciertos problemas son atribuidos a este tipo de capas. Específicamente, el temprano desgaste de capas gruesas puede reducir la vida útil.

Ensayos de adhesión y la implementación de recubrimientos al servicio con espesores diferentes han demostrado que la adhesión y la vida de servicio disminuyen con el aumento de espesor de dichos recubrimientos [21].

Howell [22], en un estudio sobre recubrimientos metálicos aplicados a concretos, indica que incrementando el espesor se produce una disminución de adherencia. Los resultados obtenidos por Unger y Grossklaus [21] muestran que para algunos recubrimientos la adherencia de una capa gruesa aplicada a un acero inoxidable o titanio puede ser tan baja como un tercio de la fuerza de adherencia de una capa delgada. Woods presenta datos para recubrimientos en motores de combustión interna que indican una tendencia de disminución de adherencia y decreciente número de ciclos para falla con disminución del espesor del recubrimiento [23]

Una hipótesis creíble para explicar este comportamiento es que los esfuerzos residuales contribuyen a la reducción de la fuerza de adherencia para espesores más gruesos. Las tensiones residuales son inherentes al proceso de rociado térmico. Estas tensiones son a menudo debidas a la aplicación de este tipo de recubrimientos a alta temperatura en un sustrato con temperatura menor; una vez enfriado, el recubrimiento se contraerá más que el sustrato. Dicho sustrato restringe la contracción de la capa del recubrimiento, por tanto la capa de recubrimiento tendrá esfuerzos residuales después de enfriamiento [24].

Rybicki y Stonesifer [25] demostraron que los esfuerzos residuales tienen claramente un efecto de reducción del esfuerzo a la fractura en un recipiente a presión para condiciones elásticas lineales. En otra búsqueda, relacionada con la contribución de esfuerzos residuales para desprender la capa del recubrimiento, es que fuerzas de tracción en el plano actúan en la misma dirección que los esfuerzos residuales en las capas del recubrimiento, que causan desprendimiento de borde libre (free-edge effect) de la placa [26]. En el apéndice de este documento se describe el efecto de borde libre.

En otro experimento el material seleccionado para el recubrimiento fue de composición 95% Ni y 5% Al (% en peso). El material del sustrato fue acero AISI 1018. Las muestras con que se hizo la experimentación fueron sometidas a un relevado de esfuerzos. Los espesores de recubrimiento fueron aproximadamente 0.254, 0.762, 1.143 y 1.524 mm; donde fueron preparados para evaluaciones metalográficas, fuerza de adhesión y esfuerzos residuales. El equipo usado fue un sistema Hobart Tafa modelo 9000 de proyección por arco y un alambre Tafa Bondarc 75B (Ni-5Al); con una aplicación a una distancia de 75mm y un ángulo de 90°, aplicado por un robot, el cual aplicaba un espesor de 0.0686mm de

espesor por pasada aproximadamente [26]. Los resultados experimentales son mostrados en la figura 2.6.

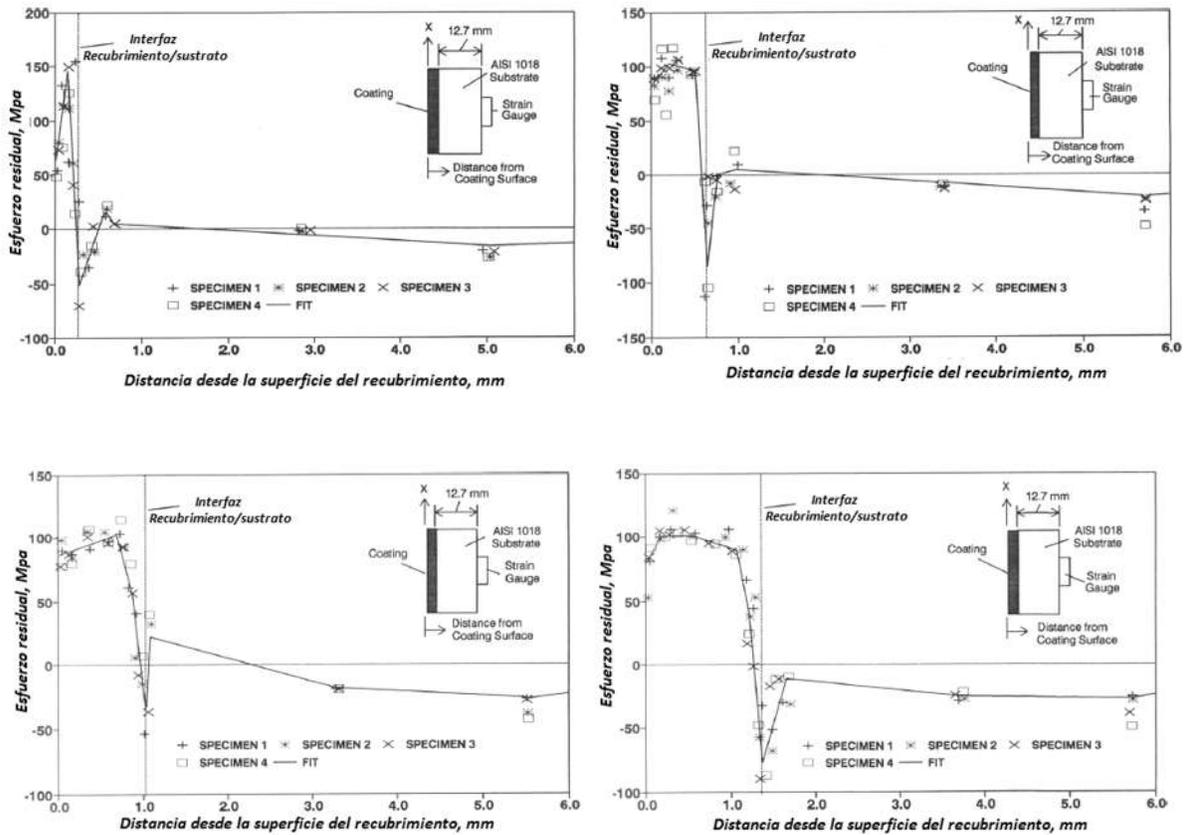


Figura 2.6. Distribución de esfuerzos para distintos espesores del recubrimiento, 0.254, 0.762, 1.143 y 1.524mm [26].

Los datos de la prueba de resistencia de unión demuestran que la resistencia de la unión del recubrimiento por proyección térmica disminuye con el aumento del espesor del recubrimiento.

En otro estudio, se analizó el comportamiento fuerza adhesiva-espesor y se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente gráfica. Como se puede observar en la figura 2.7, se encontró una disminución en las fuerzas adhesivas conforme se incrementó el grosor del recubrimiento [26].

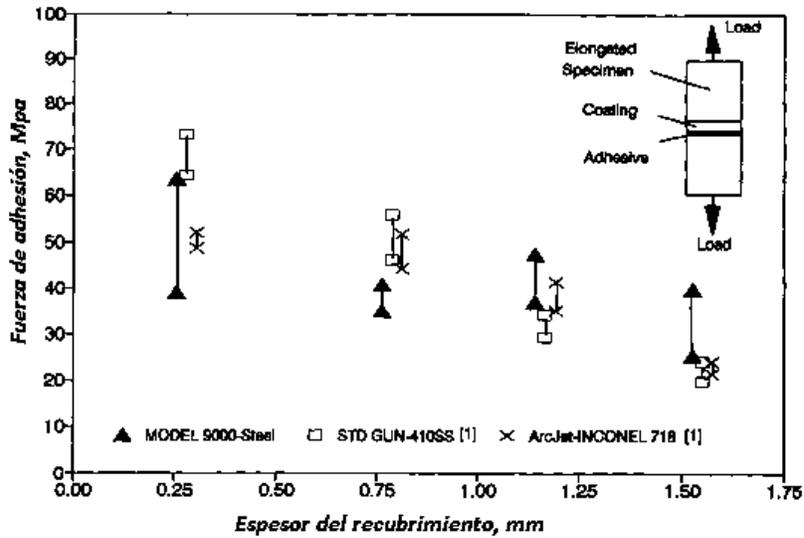


Figura 2.7. Valores máximos y mínimos de la fuerza de adhesión para diferentes espesores del recubrimiento [26].

Los polvos usados para este análisis fueron una aleación NiCrBSi y WC-Co con un tamaño de partícula de 45 μm a 74 μm y 15 μm a 53 μm respectivamente, por el proceso de proyección de alta velocidad oxígeno/combustible, alcanzando una fuerza de adhesión de 70MPa. Se encontró una fuerte dependencia de la fuerza de adhesión con la rugosidad previa del sustrato [6, 27], figura 2.8.

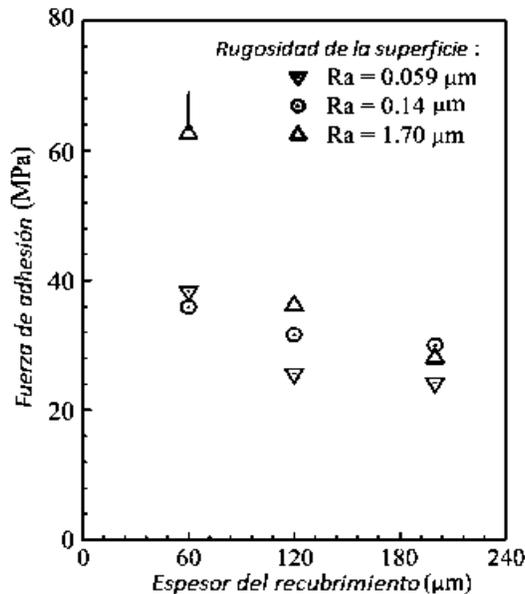


Figura 2.8. Efecto del espesor sobre la fuerza de adhesión con un recubrimiento WC-Co y la influencia de la rugosidad [6].

Stokes y Looney [28], encontraron que el estado de esfuerzos residuales desarrollado en el depósito por el proceso de rociado térmico es altamente dependiente de las condiciones a las cuales ha sido sometido el sistema, que es una combinación de las tensiones que surgen durante la deposición, y las tensiones de enfriamiento, después de la deposición.

Clyne y colaboradores, utilizaron un método analítico para caracterizar los esfuerzos residuales, y analizar su dependencia con el espesor del depósito. El recubrimiento aplicado fue de WC-Co, con espesores desde 0.2 a 3mm.

Los resultados no son lineales y son mostrados en la Figura 2.9. Los cuales son divididos en tres zonas; la zona A, con un espesor de depósito de hasta 1 mm, muestra que el esfuerzo en la superficie del depósito disminuye drásticamente. El esfuerzo disminuye a una tasa a partir de 1mm y hasta el espesor de 2 mm (zona B). En la zona B el esfuerzo sobre la superficie del depósito, cambia de tensión a esfuerzo de compresión. En espesores superiores a 2 mm (zona C), el esfuerzo en la superficie del depósito disminuye a una tasa alta de nuevo.

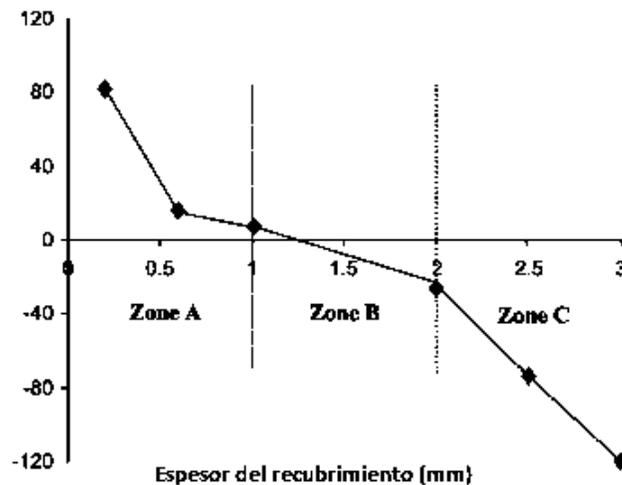


Figura 2.9. Tensión superficial como función del espesor del recubrimiento [28].

De acuerdo con la forma de la curva en la figura 7, un espesor de depósito de aproximadamente 1.2 mm produce un depósito sin esfuerzo.

Para analizar el estado de esfuerzos residuales, se parte de la asunción de que el esfuerzo producido por el enfriamiento del depósito realizado siempre será de tensión, esto debido a que su temperatura será mayor que la del sustrato. Se realizó un análisis con un enfriamiento forzado con CO₂ y otro sin enfriamiento forzado, figuras 2.10 y 2.11.

Se dedujo que al incrementar el espesor del recubrimiento, se reducen los esfuerzos de tensión. Y al incrementar el espesor decrecen los esfuerzos de compresión. La suma de los esfuerzos tanto de tensión como compresión, nos darán el valor del esfuerzo residual presente en el proceso. Esto se muestra en la Figura 2.8.

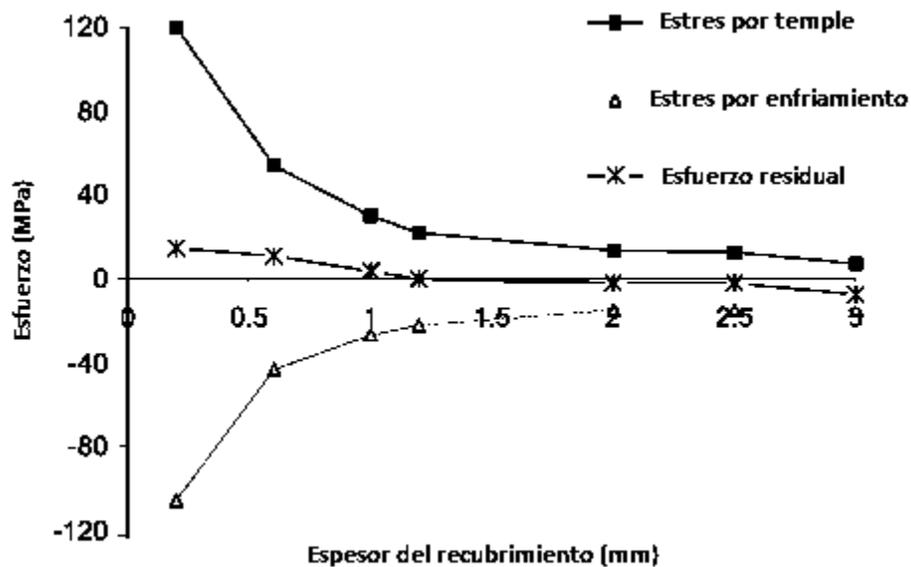


Figura 2.10. Esfuerzos por temple y enfriamiento en función del espesor del recubrimiento, con enfriamiento forzado [28].

Cuando se utiliza CO₂ para forzar el enfriamiento, se reduce la temperatura en el proceso de rociado, que a su vez reduce los esfuerzos tanto de tensión como compresión. El efecto de no usar enfriamiento por lo tanto, es desplazar la curva de la tensión residual a la izquierda, por lo tanto, el espesor libre de esfuerzo será a 0.6 mm.

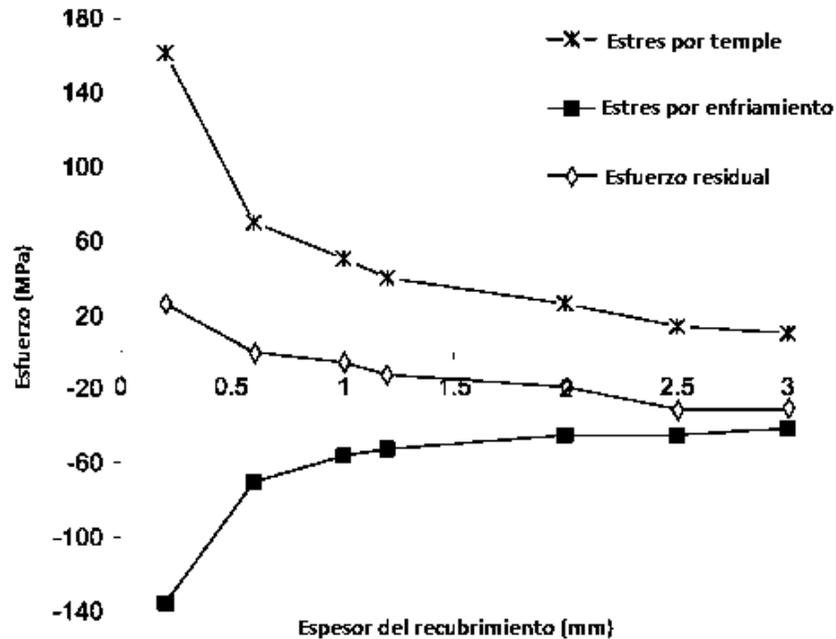


Figura 2.11. Esfuerzos por temple y enfriamiento en función del espesor del recubrimiento, sin enfriamiento forzado[28].

2.8 Comportamiento al desgaste de recubrimientos por rociado térmico

En una investigación de Rodríguez y colaboradores, se ha analizado la influencia sobre el comportamiento de desgaste de varios factores tales como la carga, la temperatura, la presencia de carburo de tungsteno en los polvos y del tipo de técnica de proyección térmica utilizada (Proyección por plasma y proyección por llama). Como sustrato se empleó acero al carbón SAE 1045, como recubrimiento dos aleaciones, una base níquel CASTOLIN CPS 1235 y una segunda aleación METCO 36C; siendo las dos muy similares, con la diferencia de la presencia de carburo de tungsteno en la segunda [29].

Un aspecto interesante es el papel de la WC dentro de los polvos, son las partículas de carburo de tungsteno, que se forman durante el proceso de proyección no son beneficiosos en absoluto, lo que aumenta en gran medida la pérdida de masa de las contra caras durante las pruebas de desgaste, mientras que ninguna mejora significativa es provista en la resistencia al desgaste de la muestra. Probablemente, esto se deba a una débil unión entre partículas y la matriz [29].

En otro estudio, es investigado el comportamiento al desgaste abrasivo de recubrimientos sobre sustratos de acero por el proceso de rociado térmico por llama. El recubrimiento se lleva a cabo sobre sustratos calientes y fríos mediante el uso de cuatro tipos de aleaciones en polvos diferentes.

El calentamiento de los sustratos antes del recubrimiento produjo una disminución en la dureza de las capas de revestimiento. Se observó que la resistencia al desgaste abrasivo de los recubrimientos es dependiente de la composición química, las características de los materiales de recubrimiento y el estado del mismo [30].

Se observó una tasa de desgaste alta inicialmente para todas las muestras analizadas, sin embargo, esta tendencia mostró una disminución después de un tiempo. Cuando todos los parámetros (excepto el calor de entrada) se cambiaron, se encontró que la resistencia al desgaste de las muestras en frío recubiertas, era más alta que las de las muestras recubiertas caliente. No hay una diferencia notoria entre las microestructuras de las capas de recubrimiento en frío y en caliente, según las micrografías de SEM [30].

Harris y Beevers [31] han investigado la energía superficial y adherencia característica de un acero dulce y una aleación de aluminio mediante el granallado con diferentes granos de alúmina. El grano más grueso produce superficies más ásperas y en general las superficies más ásperas exhiben energías superficiales más bajas. Harris y Beevers han explicado esto, teniendo en cuenta los efectos de las características geométricas de las superficies sobre la difusión de la gotita y la medición del ángulo de contacto. Sin embargo, también se observó que el proceso de granallado introduce cambios químicos en la superficie del sustrato y estos a su vez afecta a la energía superficial [31].

2.9 Factores que influyen sobre la fuerza de adhesión.

La fuerza de adhesión del recubrimiento es modificada principalmente como resultado de las tensiones residuales generadas en el proceso de deposición[32]. Las tensiones residuales son causadas por la contracción de las partículas pulverizadas después de la solidificación (proceso de enfriamiento primario) o las diferencias entre los coeficientes de expansión térmica del recubrimiento y del sustrato (proceso de enfriamiento secundario) [33].

El precalentamiento del sustrato puede mejorar significativamente la resistencia de la unión de los recubrimientos con un espesor de 200 μm , pero no cambia la resistencia de la unión de los recubrimientos con un espesor de 400 μm . Este comportamiento se puede atribuir principalmente a los diferentes mecanismos en la formación de esfuerzos residuales de recubrimientos con 200 y 400 μm de espesor. Para todos los recubrimientos, el aumento de la temperatura del sustrato produce un cambio en la forma de la gota salpicada. En los sustratos sin precalentamiento, el gota salpicada presenta contornos irregulares y la presencia de poros [34].

Por otra parte, con el aumento de la temperatura de precalentamiento hasta 150°C, la gota salpicada presenta contornos más esféricos y sin poros. Con gotas salpicadas más continuas y homogéneas, se tendrá un área más grande de contacto con el sustrato, por lo tanto, más transferencia de calor. Además de eso, este formato de gotas salpicadas aumenta la fuerza de unión mediante la mejora de los mecanismos de enclavamiento y difusión [35].

Junto con el cambio en la morfología de los gotas salpicadas, el precalentamiento también modifica los niveles de tensiones que se generan en el proceso de rociado térmico. El menor nivel de tensión residual para el sustrato con los mayores resultados de precalentamiento de temperatura, principalmente de la disminución de la diferencia de temperatura entre los materiales pulverizados y el sustrato [34].

Por lo tanto, la resistencia a la adhesión del recubrimiento aumentó de 70 hasta 85 MPa con el aumento de la temperatura de precalentamiento a 150 ° C, con espesor de revestimiento de 200 μm . La temperatura de precalentamiento no causó el mismo efecto en los recubrimientos aplicados con un espesor de 400 μm . En este caso, la resistencia de la unión ha sido igual para los recubrimientos aplicados sobre sustratos con una temperatura de precalentamiento de 150 ° C y para los que se mantienen a temperatura ambiente. Se demostró que con el aumento del espesor del revestimiento el nivel de esfuerzos residuales aumentó principalmente por el efecto del proceso de enfriamiento secundario [28].

Por otra parte, el precalentamiento tiene más influencia en la deposición de las primeras capas, porque durante las próximas capas se produce una disminución de la temperatura entre el revestimiento y el sustrato [32]. Por lo tanto, la temperatura de precalentamiento no ha sido suficiente para reducir al mínimo los esfuerzos residuales que se generan en el enfriamiento secundario de los recubrimientos aplicados con un espesor de 400 μm .

Los resultados mostraron que la fuerza de adhesión está fuertemente influenciada por el espesor del recubrimiento. Los recubrimientos con mayor grosor tienen una fuerza de adhesión inferior. La temperatura de precalentamiento ha producido diferentes comportamientos de los recubrimientos aplicados con 200 y 400 μm de espesor. La fuerza de adhesión de un recubrimiento con un espesor de 400 μm no presentó ningún cambio con la temperatura de precalentamiento [34].

Calentar el sustrato puede influir en el impacto y la solidificación de partículas fundidas en varias otras maneras. Puede:

- Reducir la velocidad de enfriamiento de las partículas que inciden sobre la superficie, dándoles más tiempo para fluir en las cavidades de la superficie y formar enlaces más fuertes.
- Formar una capa de óxido sobre la superficie. Esto reduce de ese modo velocidades de solidificación de gotitas que promueven la difusión en la interfase gotita-sustrato, y mejorar la adhesión. La capa de óxido también puede cambiar la estructura cristalina de la superficie y aumentar su micro rugosidad y mojabilidad de la superficie [36].
- Evaporar la humedad y otros contaminantes volátiles en la superficie, lo que permite un mejor contacto entre las partículas de impacto y el sustrato.

Es probable que todos estos factores contribuyeron a la mejora de la adherencia del recubrimiento[35].

En otro estudio se analizó la influencia del precalentamiento del sustrato sobre el espesor del recubrimiento. Haciendo ensayos a temperatura ambiente, 100 y 200 °C. Un acero AISI

316L y como recubrimiento una aleación en polvo Diamalloy 1003 (Mn, Si, Mo, Fe, Cr y Ni). Se encontró que el precalentamiento tiene una fuerte influencia sobre los esfuerzos residuales generados en el proceso, siendo más bajos generalmente para temperaturas por encima de 80 °C, debido a la a que la diferencia de expansión térmica entre el sustrato y el recubrimiento es más pequeña. Sin embargo, la temperatura de precalentamiento no se puede aumentar más allá de 200 ° C, ya que un cambio en la estructura del acero se puede producir.

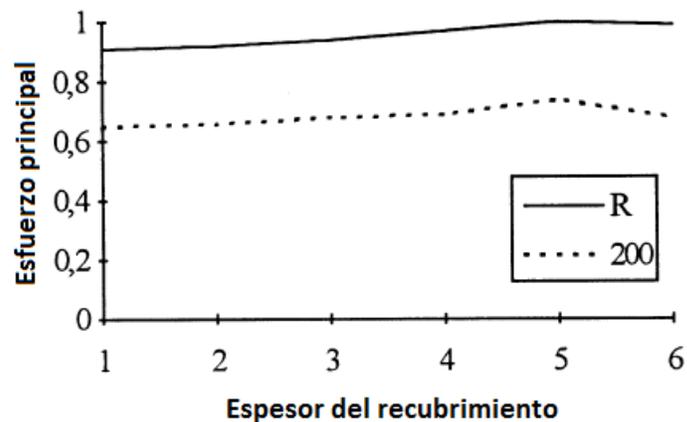


Figura 2.12. Esfuerzo principal contra espesor del recubrimiento a T amb y 200 °C [33].

La figura 2.12 muestra las tensiones residuales frente el espesor del recubrimiento, que parece tener sólo una pequeña influencia; de hecho, cuando el espesor del recubrimiento aumenta, las tensiones residuales aumenta sólo ligeramente [33].

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la ejecución del trabajo experimental es necesario el empleo de equipo de proyección térmica, equipos de medición, reguladores, material base y material de aporte o de proyección. En esta etapa del trabajo se definen las variables que intervienen en el proceso y su valor de manera que pueda ser propuesto un diseño experimental adecuado.

En el diagrama de flujo, figura 3.1, se muestra una secuencia de cómo se llevó a cabo la ejecución de los experimentos. Se propuso en primer lugar la caracterización de los materiales que se emplearon tanto para el recubrimiento, así como el material base. Una vez determinadas las variables esenciales se propone un diseño de experimento el cual se deduce una matriz de diseño que definiría las condiciones de fabricación de las probetas.

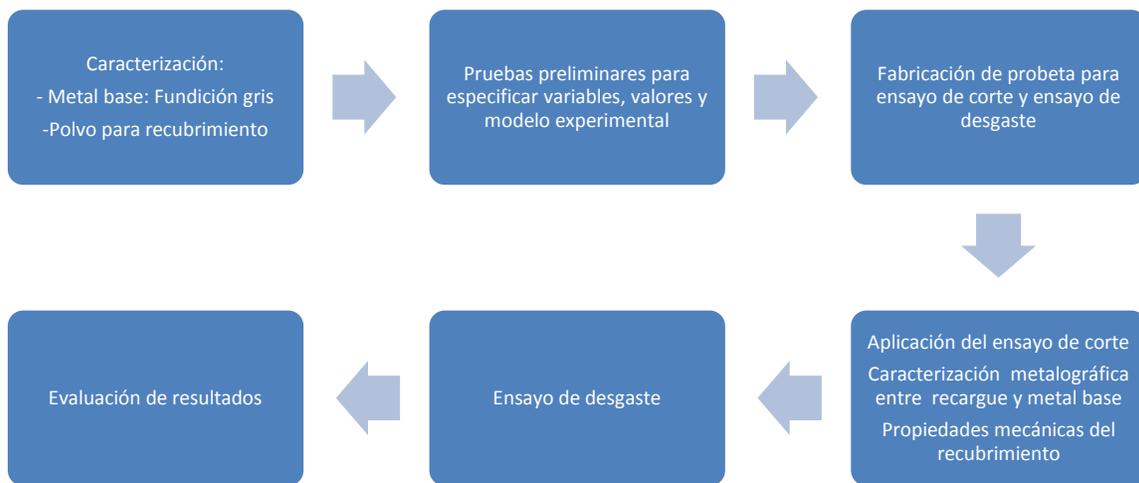


Figura 3.1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.

Las probetas debieron ser sometidas a diferentes ensayos para determinar su fuerza de adhesión y resistencia al desgaste. Se propuso también un estudio metalográfico de la zona de interfaz entre substrato y el recubrimiento.

3.1 Materiales

3.1.1 Metal base

El material base a utilizar como substrato del recargue fue una fundición de hierro gris. La cual fue elaborada con un molde de arena con una geometría en forma de prisma, como se muestra en la figura 3.2. La fundición de hierro gris tiene una composición aproximada dada por la norma ASTM A48, como se muestra en la tabla I; así como su clasificación según sus propiedades mecánicas. Tabla II.



Figura 3.2. Elaboración de la fundición con molde de arena

Tabla I. Composición química nominal de una fundición gris.

| C | Si | Mn | S | P |
|---------|---------|---------|----------|----------|
| 2.0-4.5 | 1.5-3.5 | 0.4-2.0 | 0.01-0.2 | 0.04-0.8 |

Tabla II. Propiedades según la ASTM A48 para las clases de Fundiciones Grises

| Clase | Resistencia a la tracción (MPa) | Dureza Brinell (HB) | Estructura |
|-------|---------------------------------|---------------------|------------|
| 20 | 138 | 130-180 | F, P |
| 30 | 207 | 170-210 | F, P, G |
| 40 | 276 | 210-260 | P, G |
| 50 | 345 | 240-280 | P, G |
| 60 | 414 | 260-300 | G, G |

* *F: ferrita; P: perlita; G: grafito; B: bainita*

Para poder hacer uso del material primero se tuvo que cortar la placa en una sierra cinta, para posteriormente maquinarse en un torno mecánico con buril de cobalto de alta velocidad. Las probetas se prepararon en forma de barra cilíndricas con un diámetro de 12.7 mm y una longitud de 64.35 mm. Las probetas deben tener un acabado superficial con cierto grado de rugosidad, de manera que esta confiera una mejor adhesión con el material de aporte. La figura 3.3 muestra la forma de final de las probetas para una posterior aplicación del recubrimiento.

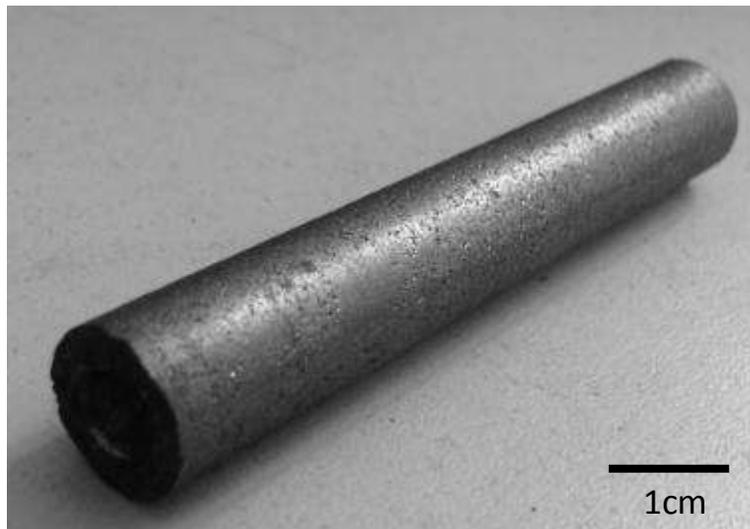


Figura 3.3. Probetas maquinadas

3.1.2 Recubrimiento.

La selección de los polvos se realizó teniendo en cuenta las propiedades que se pretenden mejorar con el recubrimiento y según las condiciones de servicio bajo las que se encontrará dicho recubrimiento. Inicialmente se tuvo la idea de la aplicación de recubrimientos para la recuperación dimensional de rodillos en la industria papelera, se consideró un peso aproximado y las dimensiones del mismo para tener una idea bajo qué condiciones trabaja. Como guía para la selección se utilizó la ficha técnica de los diferentes tipos de polvos existentes, proporcionados por el fabricante.

Los materiales utilizados como recubrimiento, serán las aleaciones comerciales del tipo MetaCeram 21032S y MetaCeram 23065, provistos por la compañía Eutectic+Castolin en forma de polvo. Las características y sus constituyentes proporcionados por el proveedor, se muestran a continuación:

- MetaCeram 21032S.- Aleación base níquel, cromo, molibdeno y tungsteno. Con una dureza aproximada de 30 HRC.
- MetaCeram 23065.- Aleación base níquel, cromo, boro y tungsteno. Con una dureza aproximada de 58 HRC.

Las aleaciones MetaCeram son producidas mediante un proceso que permite obtener depósitos densos, homogéneos y que tienen mayor resistencia a los diferentes fenómenos de desgaste.

La figura 3.4 muestra las diferentes presentaciones del material empleado para el proceso de rociado térmico.



Figura 3.4. Presentación de los polvos MetaCeram

Existen aleaciones en polvo auto adheribles y aleaciones fusibles. A continuación se hace una breve descripción de ellas:

Aleaciones auto adheribles para proceso en “Frío”. Este tipo de aleaciones son auto adheribles y no requieren un recubrimiento inicial como base. Se dice que es un proceso en frío por las temperaturas a las que se aplican, que van de 93 °C a 260 °C. Esto reduce el riesgo de distorsión de la parte a recuperar.

Aleaciones fusibles. Las aleaciones de este tipo tienen la peculiaridad de ser “aspersadas y posteriormente fundidas”. Después de ser removido el material fatigado de la zona a recuperar, la aleación es aplicada para restaurar los defectos de la pieza. El recubrimiento es a continuación fundido en el cual se eliminan casi todas las porosidades y se produce un depósito muy duro.

3.2 Caracterización mecánica y metalúrgica de la fundición gris y los polvos

Para caracterizar el material con el que se trabajó se prepararon probetas utilizando técnicas de metalografía estándar; es decir, desbaste con lijas de papel con carburo de silicio de granulometría variable y un pulido a espejo utilizando pastas de diamante de 3 y 1 μm .

Posteriormente, para revelar la microestructura de las aleaciones se realizaron múltiples pruebas con diferentes reactivos. Siendo una solución con 45% de H_2SO_4 , 43% HNO_3 y 13% de H_3PO_4 la que logro revelar la microestructura. Fue necesario dar un ataque electroquímico con esta solución con un voltaje de 6V y un tiempo de permanencia de 20 segundos.

Finalmente se observó la microestructura en un banco metalográfico con capacidad de hasta 1000X. Además se prepararon probetas para realizar ensayos de tensión, de corte, desgaste y microdureza, las medidas y normas bajo las cuales se trabajó son descritas posteriormente.

Las probetas del material base (fundición gris) para tensión se fabricaron según la norma ASTM 370 E8-04 [37], con la forma que describe la figura 3.5 y las dimensiones que muestra la tabla III.

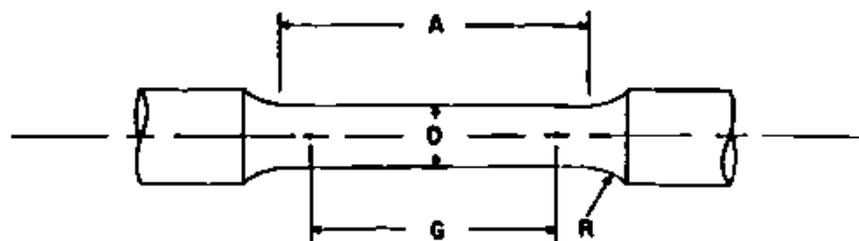


Figura 3.5. Probeta de tensión bajo la norma ASTM E8-04.

Tabla III. Dimensiones de las probetas para el ensayo de tensión de sección reducida.

| Norma ASME QW-242.1 | Especímenes tipo estándar (mm) | Especímenes Pequeños (mm) |
|--|--------------------------------|---------------------------|
| A.- Longitud de la sección reducida | 60 | 45 |
| D.- Diámetro* | 12.5 ± 0.25 | 8.75 ± 0.18 |
| R.- Radio del filete | 10 | 6 |
| G.- Longitud calibrada | 50 ± 0.10 | 35 ± 0.10 |

**La sección reducida debe tener una disminución gradual cónica de los extremos hacia el centro, con los extremos no más de 1% más grande en diámetro que el centro.*

Los polvos fueron caracterizados mediante difracción de rayos-X. El análisis se realizó en un espectro de 20 a 100° para 2 Θ , a una velocidad de 0.02 grados por segundo.

También fue necesario realizar un análisis por fluorescencia de rayos-X; con el objeto de determinar la composición química en peso de cada uno de los constituyentes. El análisis se hizo a 4g de polvo de cada aleación sobre un portamuestras de 24mm de diámetro; haciéndose un barrido desde Na hasta U. Por último, se procedió a hacer una caracterización química y morfológica en el microscopio electrónico de barrido.

3.3 Equipo

Para el recubrimiento se tiene la disposición del siguiente equipo comercial de rociado térmico, su instalación básica se muestra esquemáticamente en la figura 3.6.

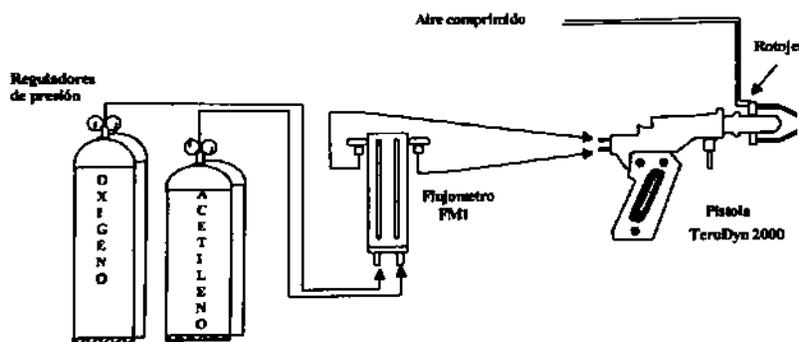


Figura 3.6. Equipo de rociado térmico por flama.

El sistema a utilizar, incorpora un sistema modular de aspersión aprovechando el alto poder calorífico (100 000 BTU/h - 105.5 MJ/h,) de una flama producida por la combustión de oxígeno y acetileno; la conducción de los gases es asistida por sellos de tipo O-Ring para protección del equipo y seguridad del operador, haciendo de este equipo, confiable y casi libre de mantenimiento; además de permitir la ejecución de una gama muy amplia de aplicaciones en las que se destacan la rapidez de reconstrucción, alta calidad y control del depósito. Con este sistema, es posible aplicar aleaciones auto adheribles, de dos pasos, fusibles, materiales cerámicos para altas temperaturas, aleaciones de bajo punto de fusión tales como el zinc y e incluso polímeros. La rapidez para efectuar recubrimientos, la alta calidad de revestimiento, el control que se tiene en la velocidad de rociado y la capacidad que posee este sistema para poder hacer aplicaciones aún fuera de posición, hace que este sistema sea adaptable fácilmente a la mayoría de las aplicaciones de recubrimiento.

Provisto con diferentes tipos de aditamentos concentradores de flama por aire comprimido, que permiten una mayor eficiencia de polvo depositado en comparación con otros procesos convencionales. Su capacidad de depósito es de 7 kilogramos, dependiendo del tipo de microfiltro a utilizar que permite aplicaciones a una mayor velocidad, como adaptarse a procesos de fabricación donde se requiera proteger las piezas metálicas desde nuevas contra los factores de desgaste. Para su funcionamiento, únicamente requiere de un equipo de acetileno y oxígeno, en el caso de aplicación de algunos polvos debe utilizarse aire comprimido.

La instalación típica consta de:

- Fuente de oxígeno y acetileno. Son indispensables dos tanques de oxígeno y dos tanques de acetileno para asegurar la adecuada operación del sistema teniendo en cuenta la demanda de gases.
- Reguladores de presión de oxígeno y acetileno. El regulador de acetileno requerido para esta operación debe trabajar en un rango de presión de 0 a 1 kg/cm² y el regulador de oxígeno con rango de 0 a 7 kg/cm².
- Flujómetro. Este dispositivo monitorea exactamente el flujo de oxígeno y acetileno en unidades de m³/min.

- Pistola de proyección. Unidad de alta potencia, puede ser empleada para depósitos de aleaciones con alta densidad y baja porosidad.

3.4 Variables del proceso

En la realización de recubrimientos por rociado térmico subsónico de polvo, es de vital importancia el control preciso de las variables, puesto que de éstas dependen los resultados finales. Las variables principales a medir y los instrumentos con los cuales se registran son los siguientes:

- **Presión:** Manómetros del tipo Bourdón, para oxígeno, acetileno y aire.
- **Flujo de gases (oxígeno y acetileno):** Flujómetros del tipo esfera flotante.
- **Temperatura máxima de operación:** Medida con pirómetro de radiación marca CEM.
- **Velocidad de giro de las probetas:** Proporcionada en revoluciones por minuto (rpm) por el torno.
- **Temperatura de precalentamiento del sustrato:** Medida con pirómetro de radiación marca CEM.
- **Distancia de aplicación del recubrimiento:** Medida con Vernier.
- **Flujo de polvo:** Válvula “T” localizada en la pistola según diseño de ésta.

Los parámetros utilizados para la aplicación de los recubrimientos están en función del tipo de polvos a aplicar. Dichos parámetros son mostrados en la tabla IV

Tabla IV. Parámetros de operación

| Parámetros de operación | MetaCeram 21032S | MetaCeram 23065 |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Presión de oxígeno | 3.5 Kg/cm ² | |
| Presión de acetileno | 0.85 Kg/cm ² | |
| Flujo de oxígeno | 0.91m ³ /min | 0.85 m ³ /min |
| Flujo de acetileno | 2.12 m ³ /min | 1.36 m ³ /min |
| Temperatura máxima de operación | 250 °C | 500 °C |

| | | |
|---|-------------------------|-----------|
| Velocidad angular del sustrato (VT) | 100 RPM | 250 RPM |
| Temperatura de precalentamiento del sustrato (TP) | 100° C | 400° C |
| Distancia de aplicación del recubrimiento (DA) | 15.2cm | 20.3cm |
| Flujo del polvo (FP) | 5.44 kg/h | 9.98 kg/h |
| Tipo de boquilla | RL 210 | RL 200 |
| RotoJet | RPA-3 | RPA-2 |
| Presión de Aire | 2.11 Kg/cm ² | |
| Porta módulo | A/R | A/R |
| Válvula T | 17 | 22 |

Para la realización de los recubrimientos fue necesario adaptar un motor de corriente continua con una capacidad de giro de 1975 rpm. La velocidad fue regulada mediante un variador de velocidad marca Valdor; y con el uso de un tacómetro se tomó lectura de la velocidad de giro real.

Fue necesario también, adaptar un cabezal que sostuviera las probeta. Y una base en la cual posicionar el equipo. La figura 3.7, muestra el equipo donde se montaron las probetas.



Figura 3.7. Equipo para montaje de probetas para recubrimiento.

3.5 Aplicación de los recubrimientos

Debido a que el acabado superficial es un factor determinante, se procedió a lijar las probetas con papel abrasivo grado 80 para conferir cierta rugosidad a la superficie y así mejorar la adhesión.

Se tomó la rugosidad promedio de las muestras (Ra) con un rugosímetro portátil. El rango de rugosidad oscilaba entre 5 y 8 μm .

Finalizada la puesta a punto del equipo y después de haber preparado el sustrato, se procedió con la ejecución de los recubrimientos utilizando los parámetros indicados en las tablas IV y V.

La figura 3.8 muestra el arreglo dispuesto para la ejecución de los recubrimientos, es apreciable la forma de sujeción de la pistola sobre el torno mediante herramientas previamente diseñadas que garantizan la aplicación mecanizada. Aparece en la foto el cono envolvente de la flama, donde viajan los polvos fundidos, sobre el sustrato preparado que se encuentra girando para de esta manera formar un recubrimiento uniforme basado en capas sucesivas.



Figura 3.8. Arreglo para la aplicación del recubrimiento.

A continuación se describen los pasos a seguir para la correcta aplicación de los recubrimientos:

1. Una vez preparada la pieza, se monta en el torno y se fija la velocidad de giro del mismo.
2. Se deben establecer los parámetros de recubrimiento y deberán permanecer fijos cuando el paso de los gases se abre o cierra por medio de un gatillo.
3. Se enciende el torno y la antorcha (sin expulsar los polvos) hasta llegar a la temperatura de precalentamiento establecida.
4. Cuando se alcanza la temperatura, se tira del gatillo para proyectar los polvos. Se debe tener cuidado en el tiempo de permanencia, ya que con mucho tiempo se rebasará la temperatura máxima.
5. Para los polvos no fusibles, se debe realizar el recubrimiento en múltiples pasadas (según el espesor final deseado).
6. Monitorear el espesor después de cada pasada para saber cuándo parar.
7. Obteniendo el espesor requerido, se deben cerrar las válvulas que controlan los flujos de gases, las llaves de los tanques y apagar el torno.

*Entre cada pasada es necesario cerrar las válvulas de flujo, esto se hace desde la pistola.

Con el fin de no desperdiciar el gas y contaminar el ambiente; el tiempo de espera entre cada pasada dependerá del tipo de material y la máxima temperatura de operación permisible para la aplicación de los polvos no fusibles.

Durante la ejecución de los recubrimientos, se trabajará teniendo presente las siguientes consideraciones:

- Recomendaciones de prácticas de seguridad especificadas en AWS C2. 1-72, “Recommended Safe Practices for Thermal Spraying”.
- El manejo de los gases, procedimientos de encendido y ajuste de la flama, se realizarán de acuerdo a las recomendaciones especificadas en AWS y el manual de rociado térmico de Eutectic Castolin.
- Se debe utilizar en todo momento el equipo completo de seguridad, que consta indispensablemente de peto, guantes, gafas de cuatro sombras, mascarilla nasal y tapones auditivos.

- Se debe mantener el área de trabajo lo mejor ventilada posible para el adecuado desalojo de gases, polvos y humos producidos.
- Se debe mantener en todo momento, la superficie del recubrimiento libre de cualquier contaminación por polvo, aceite o suciedad.
- Finalizados los recubrimientos, el cierre de válvulas de gases y polvo, se debe realizar de acuerdo a lo recomendado por AWS y el manual de rociado E+C. posteriormente, se realizar el desmontaje del equipo con las probetas recubiertas para ser dejadas enfriar en aire sin corrientes convectivas y evitar choques térmicos.

3.6 Ensayo de corte

Para la ejecución del ensayo de corte, se prepararon en un torno los dieciocho sustratos requeridos según la norma ASTM STP640, la que establece los requerimientos necesarios para estos ensayos. Las barras cilíndricas de acero tendrán 12.7 mm de diámetro y 64.35 mm de longitud. La figura 3.9 muestra un esquema con las dimensiones finales.

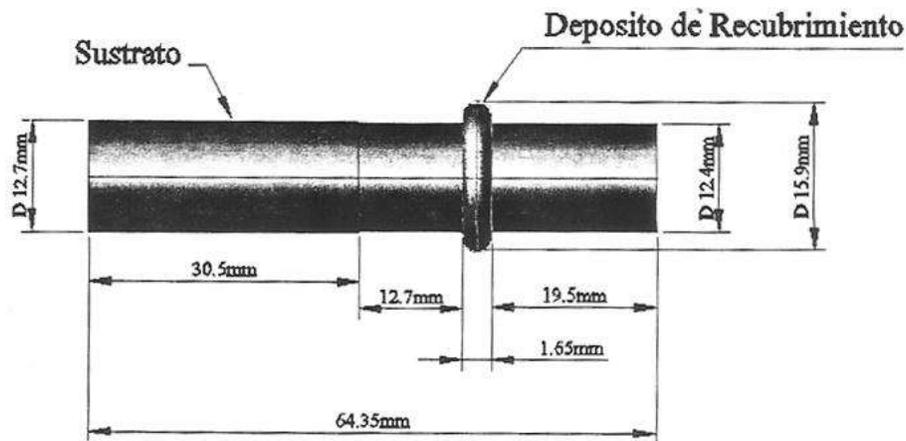


Figura 3.9. Dimensiones de probeta para ensayo de adhesión.

El maquinado de las piezas a las que se aplicó el recubrimiento con polvos MetaCeram 21032S, fue en un torno convencional y como herramienta de corte un buril de cobalto de alta velocidad a una velocidad de giro de 250 rpm.

El maquinado de las piezas a las que se aplicó el recubrimiento con polvos MetaCeram 23065, fue más complejo. Se tuvo que adaptar una pulidora con disco de desbaste de metal a la torre de herramientas del torno. La velocidad de giro del torno fue de 45 rpm. Se debió

tener especial cuidado con esta técnica de desbaste, mantener una baja velocidad de desbaste hasta obtener las dimensiones requeridas. La figura 3.10, muestra esquemáticamente la configuración utilizada para la realización del maquinado de estas probetas.

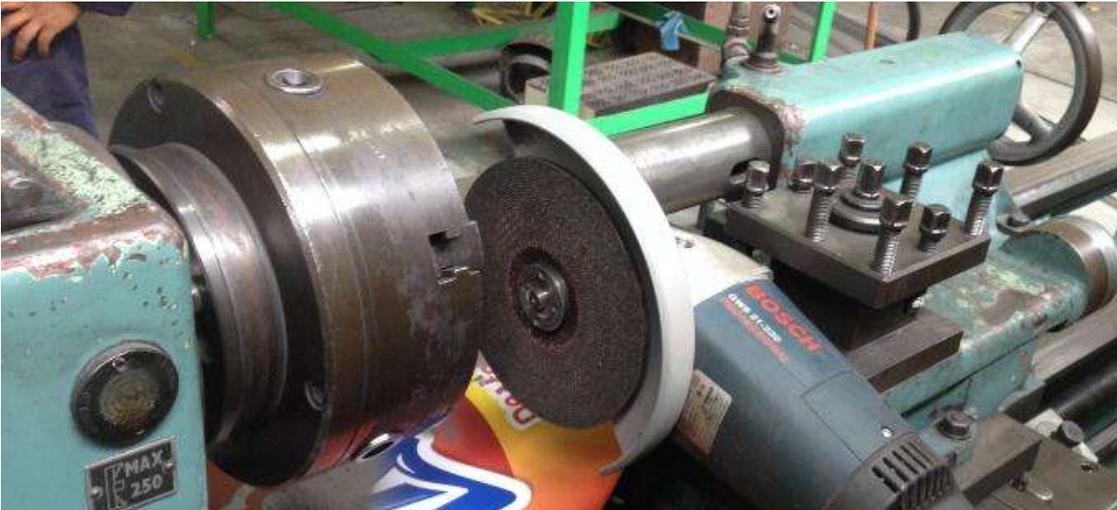


Figura 3.10. Configuración utilizada para la realización del maquinado de probetas recubiertas con polvos MetaCeram 23065.

Se preparó un bloque con un orificio para poder realizar el ensayo de corte. Para evitar fluctuaciones debidas a la deformación plástica del material del bloque después de varios ensayos, fue necesario emplear un acero AISI 9840 tratado térmicamente. Las dimensiones se muestran en la figura 3.11.

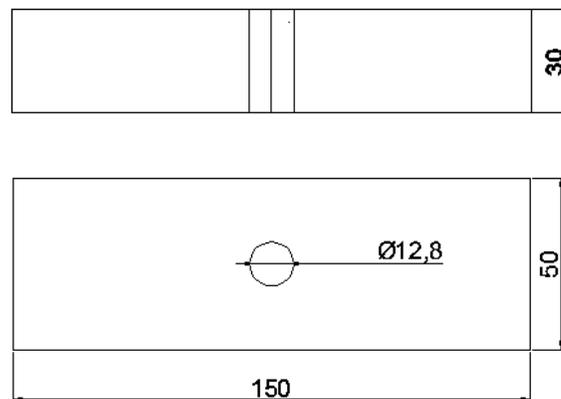


Figura 3.11. Bloque de acero para ensayo de corte.

Una vez maquinadas las probetas con las dimensiones especificadas, se procederá a realizar el ensayo de resistencia al corte. La figura 3.12 muestra una de las probetas preparadas para el ensayo de corte.



Figura 3.12. Probeta maquinada para ensayo de corte.

El ensayo de corte fue realizado en una maquina universal Zwick/ Roell Z100 que posee una capacidad máxima de 100 kN. La velocidad de desplazamiento utilizada fue de 1mm/min.

3.7 Ensayo de desgaste

Entre los ensayos de desgaste que se pueden aplicar se encuentra el ensayo de perno en disco (*pin-on-disk*) o de perno en anillo (*pin-on-ring*). Debido a la disponibilidad de la maquina se utilizó el ensayo con una máquina de desgaste de perno en anillo del que se muestra un esquema en la figura 3.13.

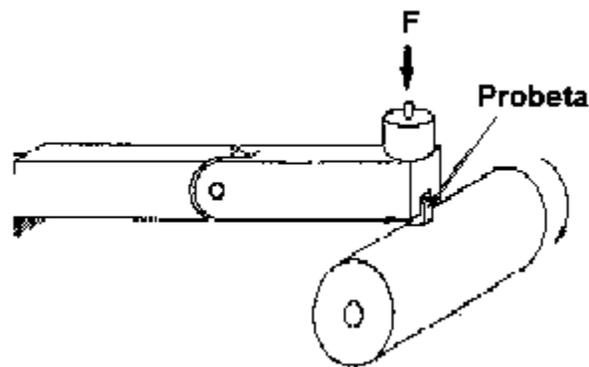


Figura 3.13. Esquema de un sistema de ensayo de desgaste “perno en anillo”.

Para el ensayo de desgaste “perno en anillo”, se requieren una de dos diferentes morfologías. La primera es con una sección cuadrada y la segunda con sección circular; que es colocada perpendicularmente a la otra superficie, la cual usualmente presenta una forma

de anillo o rodillo cuya superficie es lisa. El espécimen es presionado contra el disco bajo una carga específica usualmente por medio de un brazo o un nivel, sobre el brazo se coloca el peso determinado. La máquina es mostrada en la figura 3.14.



Figura 3.14. Máquina utilizada, tipo “perno en anillo” para los ensayos de desgaste.

El ensayo de desgaste fue realizado en una máquina *perno en anillo*, con una contracara de acero rápido grado herramienta M2 tratado térmicamente, utilizado por su alta dureza. La contracara es mostrada en la figura 3.15.



Figura 3.15. Contracara de acero M2 tratado térmicamente.

La realización del ensayo de desgaste se llevó a cabo preparando la contracara con papel abrasivo desde grado 1200 hasta 2000; a fin de mantener una superficie de contacto lisa que contribuya a la obtención de óptimos resultados. Dicha preparación de la contracara se hizo sistemáticamente después de cada tres pruebas.

El espécimen a utilizar para las pruebas de desgaste en seco, tendrá las dimensiones mostradas en la Figura 3.16.

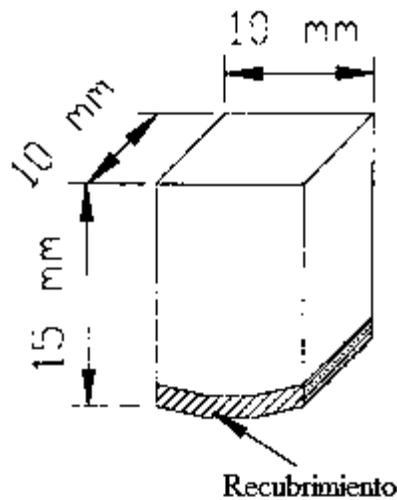


Figura 3.16. Dimensiones para probeta de desgaste.

Se prepararon 21 probetas con una sección transversal cuadrada de 1 x 1 cm, obtenidas de una barra cilíndrica a la que se aplicó el recubrimiento. Los espesores a estudiar, fueron de 1, 2 y 3mm. Las cargas bajo las cuales se realizó el ensayo de desgaste fueron 52.6, 103.5 y 154.4N; la velocidad de giro de la maquina será la máxima que nos permite, 0.865 m/s; la distancia a recorrer fue de 5000 m. Dichas variables fueron establecidas en base al conocimiento que se tiene del desgaste en seco de una fundición gris [2].

El ensayo se hará bajo condiciones de desgaste en seco; es decir, sin la presencia de algún tipo de lubricante.

El desgaste del recubrimiento fue medido en base a la pérdida de peso de las probetas sometidas al ensayo de desgaste; para esto se pesó la probeta antes y después de la ejecución del ensayo.

3.8 Ensayo de dureza

El ensayo se realizó utilizando un microdurómetro Vickers, se hizo un perfil de barrido aleatorio en diferentes secciones de recubrimiento. Las probetas con las que se trabajó fueron sometidas a desbaste con lijas de SiC de granulometría 180 a 1500, después pulidas

con pastas de 3 y 6 μ m y finalmente sumergidas parcialmente una solución con 45% de H₂SO₄, 43% HNO₃ y 13% de H₃PO₄ para revelar la microestructura.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo de investigación, se aplicó el recubrimiento a 50 probetas diferentes con la geometría cilíndrica antes mencionada. De las cuales 39 de ellas fueron utilizadas para los diferentes ensayos establecidos.

De las 11 probetas restantes, algunas fueron desechadas debido a una falla en la aplicación del recubrimiento, como fue la caída de presión de aire en el sistema, un mal control de la temperatura y por no cumplir con el espesor final de recubrimiento requerido. Otras simplemente quedaron como probetas de respaldo.

4.1 Análisis microestructural

En esta parte del trabajo de investigación, se realizó un análisis con la ayuda del microscopio óptico y del microscopio electrónico de barrido. Obteniendo los resultados que a continuación se muestran.

4.1.1 Micrografías de la fundición gris

La microestructura de la fundición elaborada es mostrada en la figura 4.1. Se puede observar que la estructura presente tiene una matriz perlítica y el grafito se encuentra disperso de forma laminar. Esta microestructura se debe al proceso de elaboración del material; el molde de arena que fue empleado, mismo que confiere una velocidad de enfriamiento lenta del material fundido.

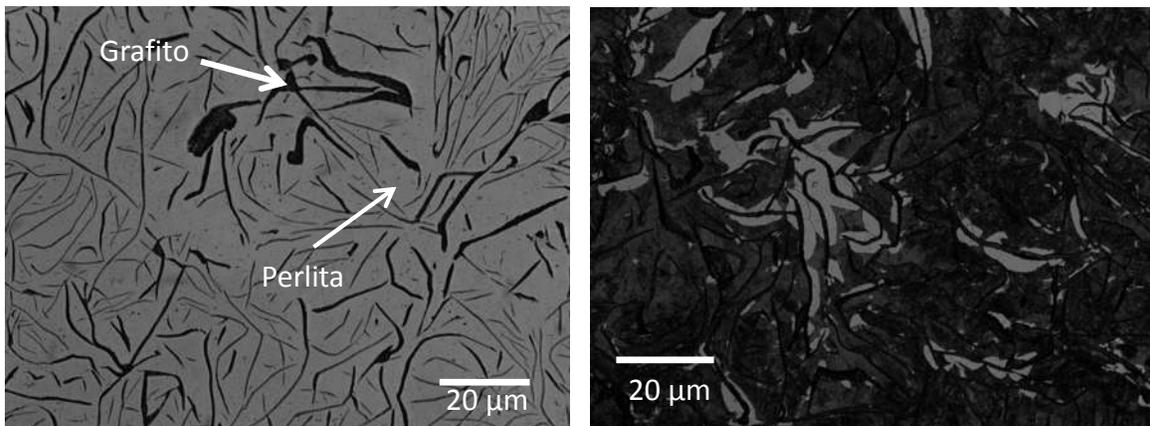


Figura 4.1. Micrografías a) Sin ataque b) Con ataque nital 2%

4.1.2 Caracterización de los recubrimientos

Recubrimiento de aleación MetaCeram 21032S

Se comenzó el análisis de los polvos mediante su caracterización por microscopía electrónica de barrido. De ahí se observa una forma irregular de la partícula; y un tamaño en el rango de 80 a 120 μm . La morfología de las partículas es mostrada en la figura 4.2.

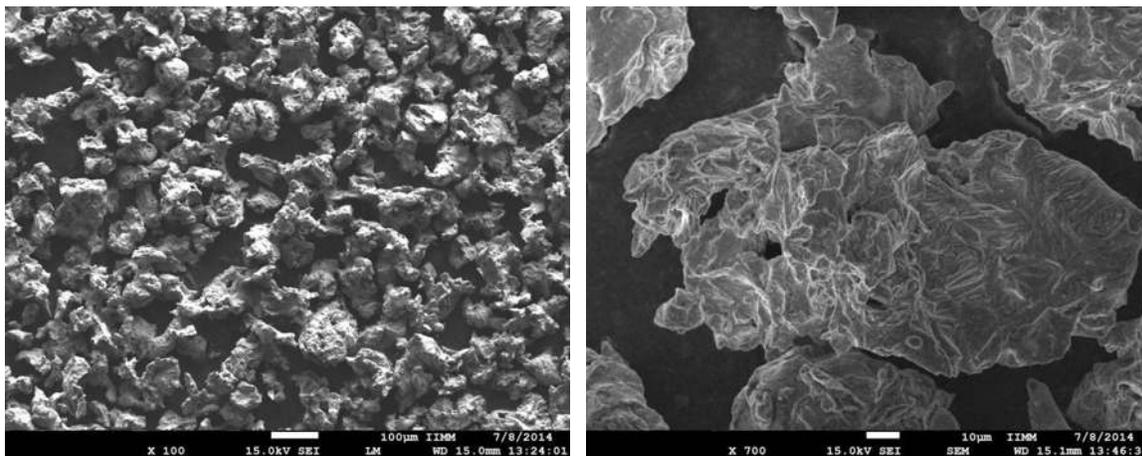


Figura 4.2. Partículas Metaceram 21032S

La morfología de las partículas de esta aleación, está dictada por el proceso de fabricación de atomización por agua. Estos polvos por su morfología presentan una alta área superficial; dicha área superficial es necesaria, puesto que son aplicados por la técnica de rociado en frío y al ser atomizados durante su estancia en la flama logran una fusión parcial por ser mayor la transferencia de calor de la flama a la superficie, al impactarse sobre la superficie rugosa se enganchan mecánicamente a la superficie preparada del sustrato y dado a su alta área superficial también la cantidad de óxidos se incrementa.

Las microestructuras mostradas en la figura 4.3 nos muestran una matriz en forma de pequeños glóbulos, siendo estos los polvos proyectados que han sido deformados por el mismo proceso. El cambio de tonalidad en el color se debe a la existencia de una segunda fase. Una de las características principales de este tipo de recubrimiento, es que los polvos aplicados no son completamente fusibles; lo que nos genera cierta porosidad en todo el volumen del recubrimiento. En las micrografías esta porosidad se distingue por un color oscuro.

Este recubrimiento fue conformado por una gran cantidad de partículas que fueron proyectadas a gran velocidad hacia el acero previamente preparado; estas se adhirieron

mecánicamente en la superficie rugosa preparada y entre ellas mismas para formar dicho recubrimiento que consiste de varias capas sucesivas hasta haber obtenido el espesor deseado.

En la figura 4.3 se aprecia que la estructura de los recubrimientos realizados por esta técnica, siempre tendrán la presencia de óxidos (gris claro), porosidades (negro) e incluso la presencia de partículas extrañas que pueden introducirse como impurezas en gases o polvos.

La presencia de inclusiones en cantidades significativas en los recubrimientos, debilitan principalmente la resistencia a la adherencia y la dureza del recubrimiento.

Se realizó el recubrimiento en capas sucesivas, logrando un espesor aproximadamente de 0.5 mm por pasada hasta completar el espesor deseado. Cabe mencionar que para la aplicación del recubrimiento fue necesario esperar el tiempo necesario (2 a 5 minutos aproximadamente) para que la temperatura se mantuviera en el rango permisible (220 °C como máximo). Temperatura que fue medida continuamente con un pirómetro de radiación.

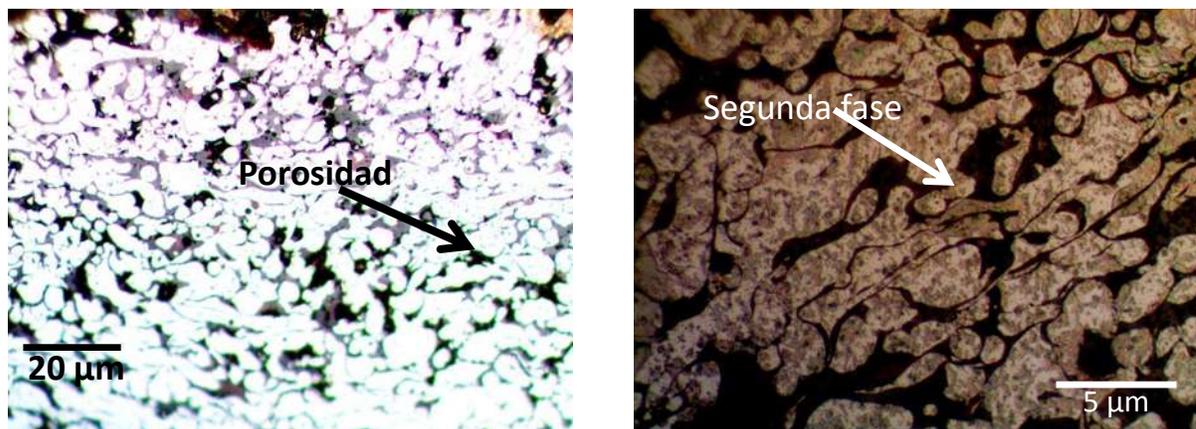


Figura 4.3. Micrografías del recubrimiento 21032S a) 200X b) 500X.

Mediante el análisis por microscopía electrónica de barrido, se encontró que esta segunda fase es un óxido de titanio. Se realizó un análisis mediante la técnica EDS para determinar la composición química en peso de la aleación en polvo, cuyos resultados son mostrados en la tabla V y en la figura 4.4.

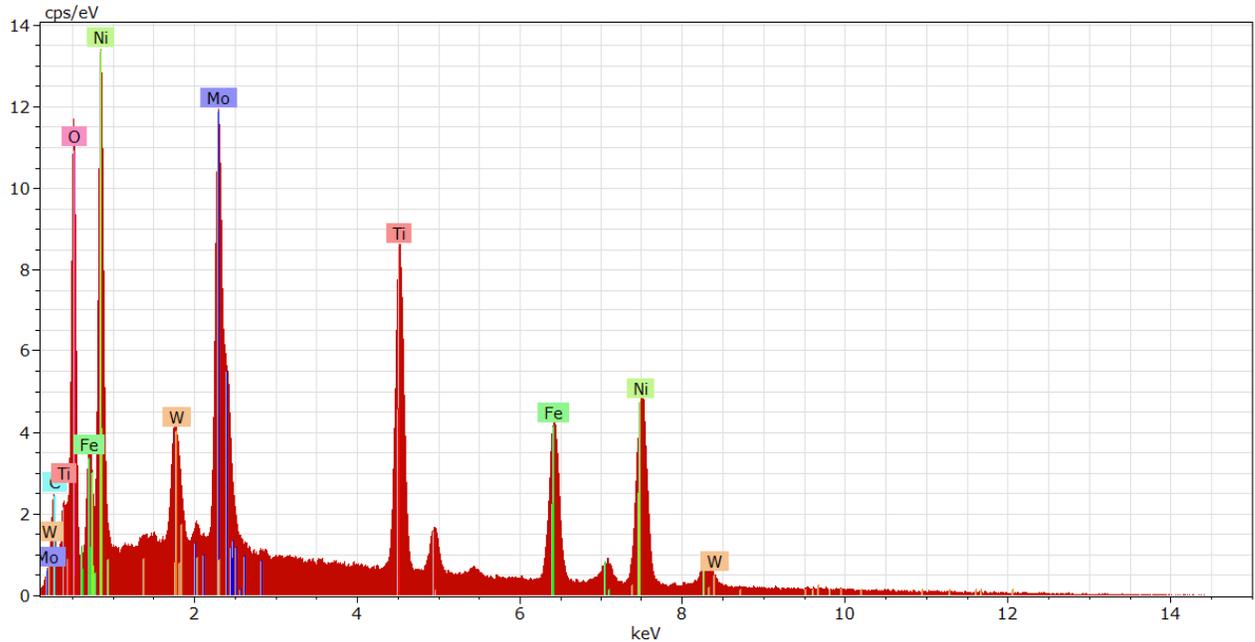


Figura 4.4. EDS de la aleación 21032S.

Tabla V. Composición química de la aleación 210332S

| Elemento | % en peso |
|-----------|-----------|
| Níquel | 18.96 |
| Carbono | 15 |
| Titanio | 9.76 |
| Hierro | 9.3 |
| Molibdeno | 5.07 |
| Tungsteno | 1.46 |
| Oxígeno | 40.42 |

La interacción de las partículas calientes con su ambiente alrededor conducen a la formación de películas de óxido sobre la superficie de dichas partículas. En tanto las partículas se extienden con el impacto, las películas de óxido se fracturan con el flujo del metal sobre la superficie, y se embeben en el depósito de material en tanto las gotas de éste van solidificando en forma de glóbulos, tal y como se observó en las figuras anteriores.

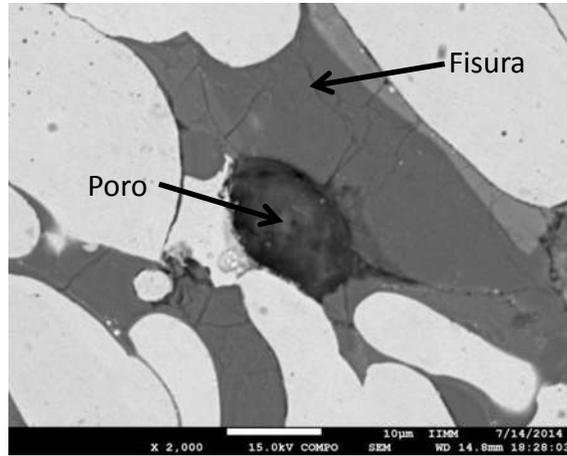


Figura 4.5. Microfisuras en la aleación 21032S

Se ha encontrado que dichas inclusiones de óxido añaden dureza al recubrimiento. En consecuencia, la composición mixta del metal y los óxidos metálicos es más dura que el metal en sí mismo. Este incremento en la dureza del recubrimiento lo vuelve más frágil, debido a que los óxidos se pueden fracturar con mayor facilidad que el resto del recubrimiento. En la figura 4.5 se pueden observar las microfisuras debidas al óxido.

Recubrimiento de la aleación MetaCeram 23065

Se comenzó el análisis de los polvos mediante su caracterización por microscopía electrónica de barrido. De ahí se observa una forma regular de la partícula; y un tamaño en el rango de 70 a 100 µm. La morfología de la aleación 23065 es mostrada en la figura 4.6.

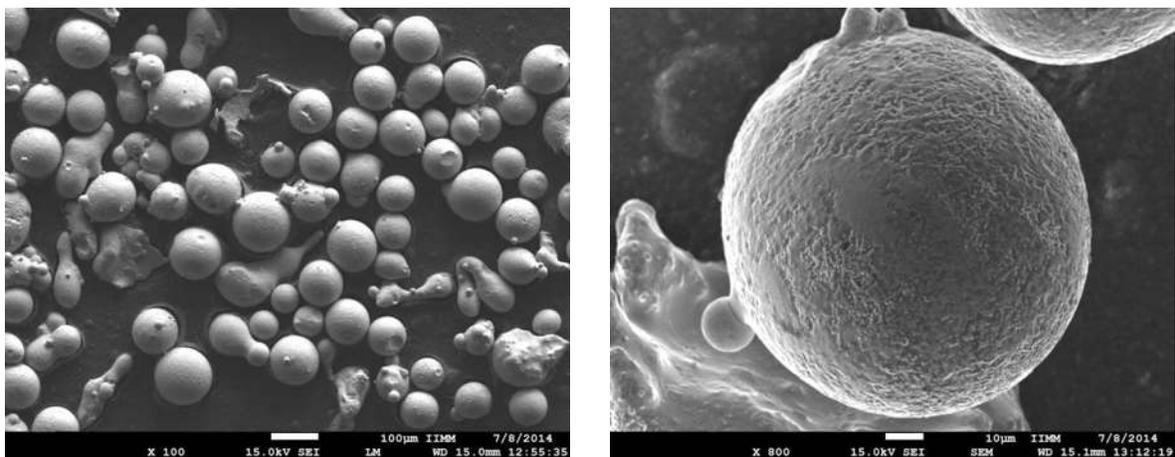


Figura 4.6. Morfología de las partículas de la aleación 23065.

La aleación 23065 de acuerdo con su morfología tipo “esferas”, procede de un proceso de fabricación de atomización por gas. En la figura 4.6 se puede ver que algunas de las partículas presentan pequeños fragmentos incrustados en la superficie, a las cuales se les conoce como “satélites”.

Las micrografías mostradas en la figura 4.7, muestran la estructura generada después del proceso de rociado térmico.

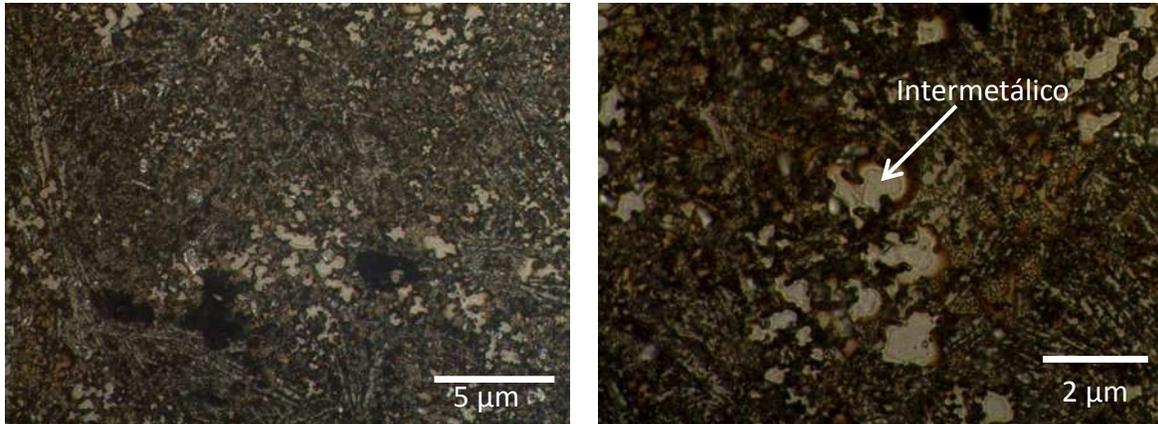


Figura 4.7. Micrografías del recubrimiento 23065 a) 500X b) 1000X

Estos recubrimientos fueron conformados por una gran cantidad de polvos fundidos proyectados al sustrato, que al impactarse en la superficie preparada, se adhirieron mecánicamente a ella y entre sí mismas para formar un recubrimiento a base de capas sucesivas.

Este recubrimiento se realizó en una sola pasada, siendo más rápida su aplicación que la del otro recubrimiento estudiado. En la ejecución se tuvo cuidado en la temperatura alcanzada, la cual no debía exceder los 500 °C.

Se realizó un análisis mediante la técnica EDS para determinar la composición química en peso de la aleación en polvo, cuyos resultados son mostrados en la tabla VI y en la figura 4.8.

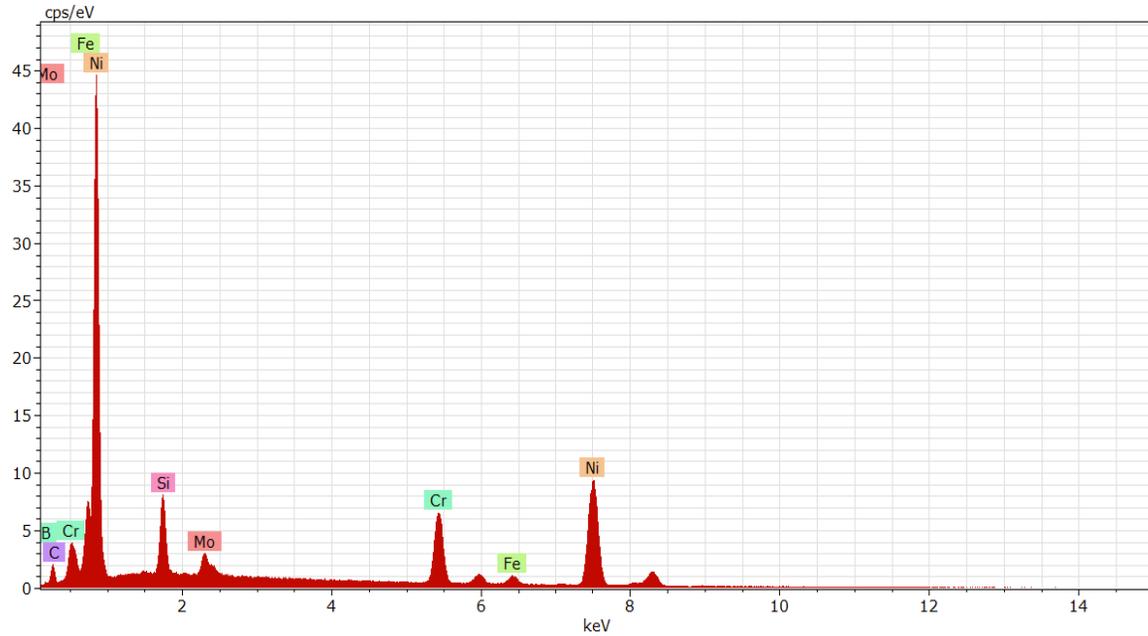


Figura 4.8. EDS de la aleación 23065

Tabla VI. Composición química de la aleación

| Elemento | % en peso |
|-----------------|------------------|
| Níquel | 78.46 |
| Carbono | 2.83 |
| Silicio | 4.26 |
| Cromo | 10.01 |
| Hierro | 2.88 |
| Molibdeno | 1.54 |

Se puede observar en las micrografías, una matriz de níquel y una aparición extensa de segundas fases o precipitados, según la composición química inicial de los polvos y el análisis puntual realizado sobre el material se ha encontrado que estos son carburos de cromo (ver figuras 4.9 y 4.10); los cuales tienen una morfología característica tipo hexagonal. Por la aparición de estos carburos se espera una alta dureza del recubrimiento.

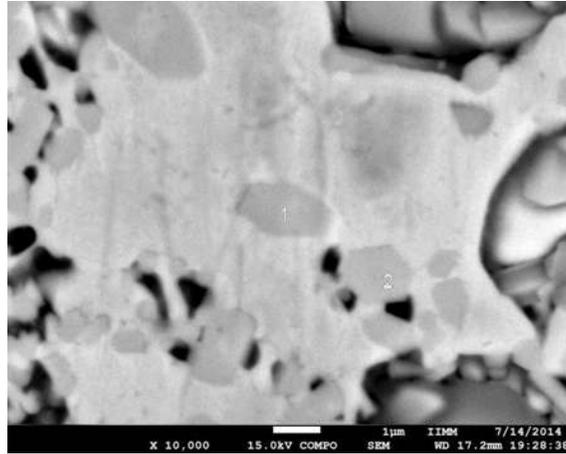


Figura 4.9. Carburos con forma hexagonal

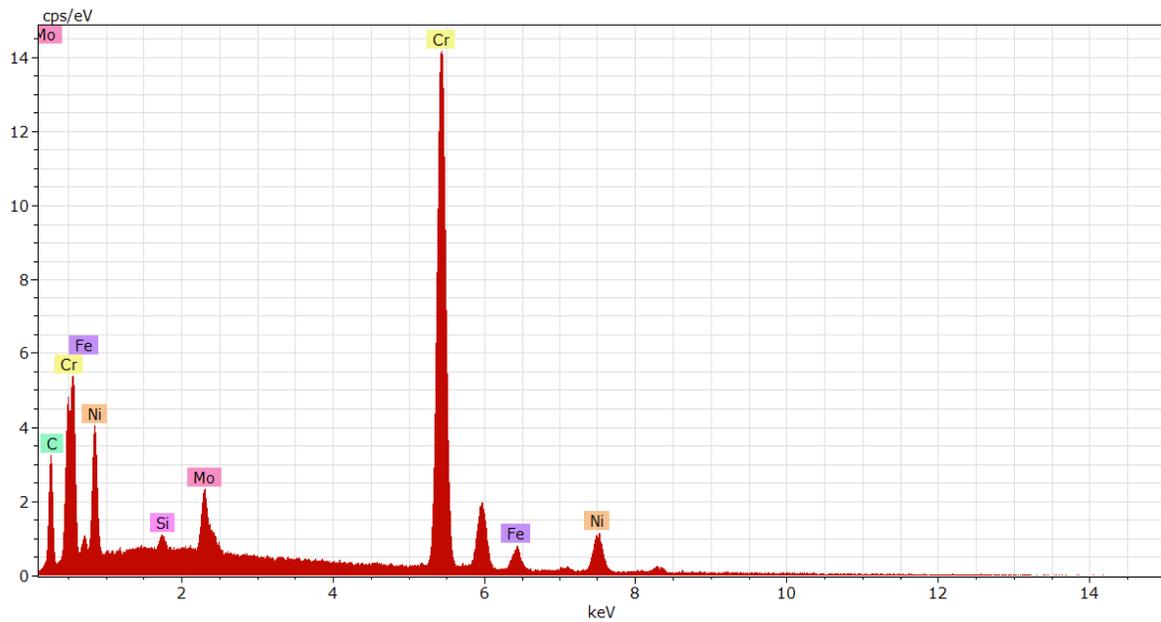


Figura 4.10. EDS realizado a uno de los carburos hexagonales.

4.1.3 Caracterización microestructural de la interfaz

En la micrografía mostrada en la figura 4.11 se observa la interfaz entre el recubrimiento y la fundición. Se puede observar que no existe una interacción por difusión entre la fundición y el recubrimiento, la interfaz queda perfectamente definida y se pueden descartar posibles fenómenos difusivos en la unión.

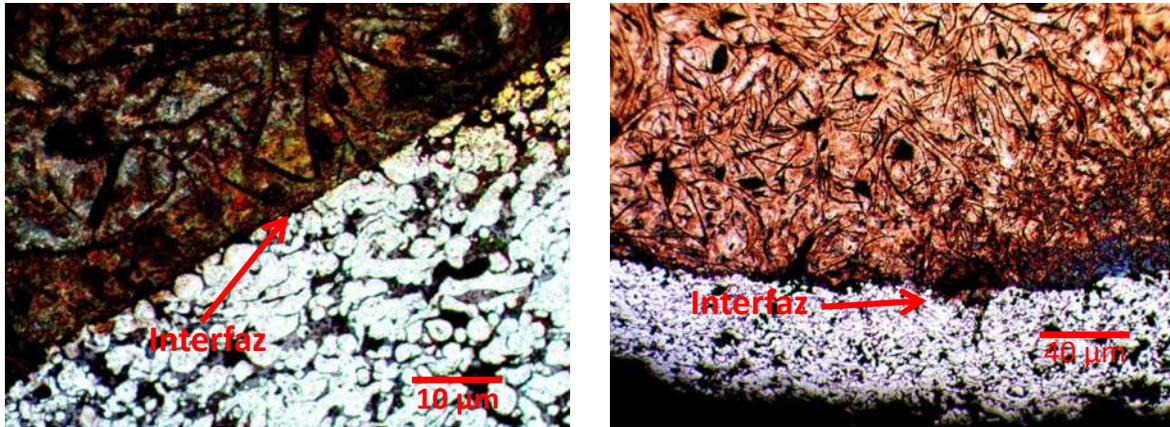


Figura 4.11. Micrografías del recubrimiento 23065 a) 50X b) 200X

Fue necesario un mapeo de composición elemental en el microscopio electrónico de barrido para tener completa certeza de la no existencia de fenómenos de difusión. De dicho análisis se descarta el fenómeno de difusión en este sistema. La figura 4.12 muestra el resultado del mapeo realizado.

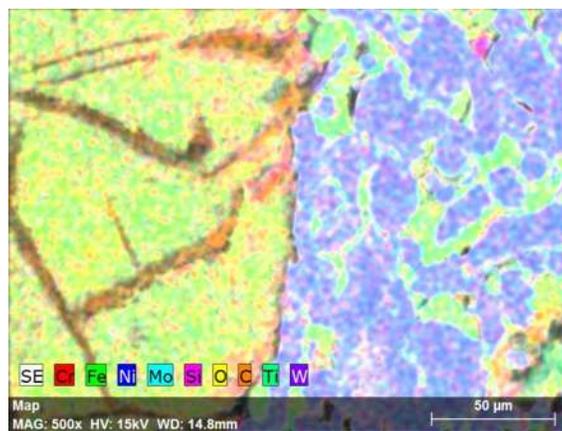


Figura 4.12. Resultado del mapeo a la aleación 21032S

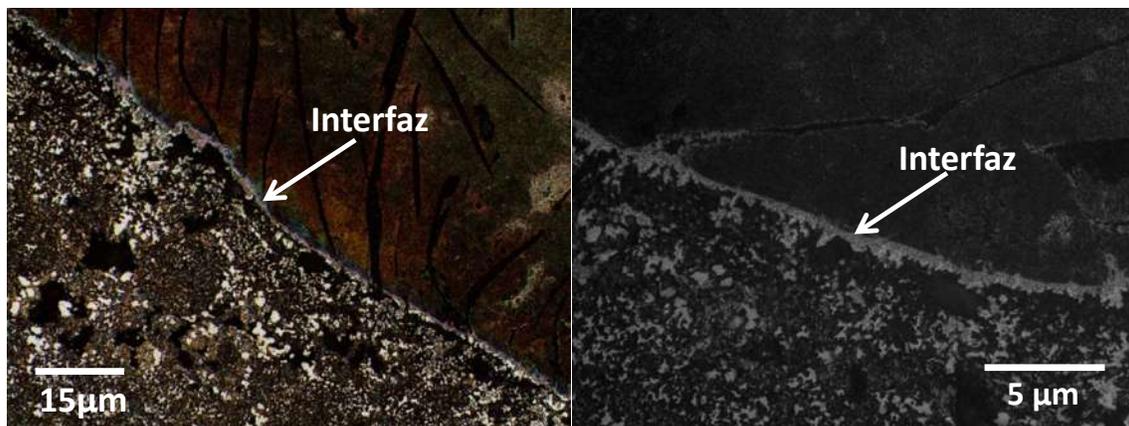


Figura 4.13. Micrografías del recubrimiento 23065 a) 200X b) 500X

En el caso de los polvos MetaCeram 23065 y debido a que la aplicación de los mismos se realiza a temperaturas superiores, no se descartaba por completo una ligera difusión entre el material base y el recubrimiento (ver figura 4.13); por lo que fue necesario realizar un mapeo en el microscopio electrónico de barrido (ver figura 4.14) para determinar la presencia de dicho fenómeno. Del mapeo se obtienen los siguientes resultados y por ellos, se descartan fenómenos difusivos entre este par de materiales.

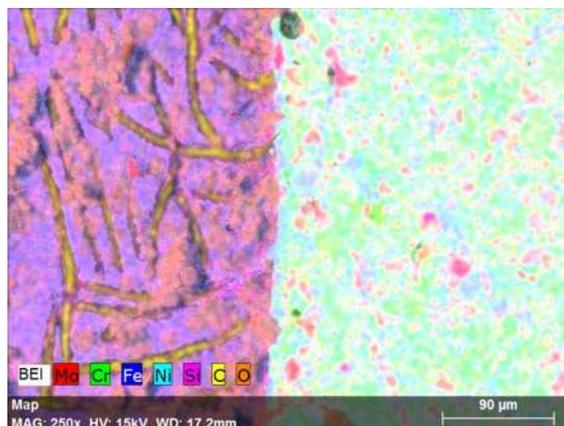


Figura 4.14. Resultado del mapeo lineal a la aleación 23065

4.2 Análisis químico de la fundición gris

Se realizó el análisis químico de la fundición gris por el método de espectrometría de emisión óptica en la empresa FUNDIDORA MORELIA S. A. DE C. V. Pudiéndose determinar los elementos presentes en una muestra así como el porcentaje en peso de cada uno de ellos. Dichos resultados son mostrados en la tabla VII.

Tabla VII. Composición química de la fundición gris.

| C | Si | Mn | S | P |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 3.1 | 2.293 | 0.022 | 0.011 | 0.033 |

4.3 Análisis de los polvos por difracción de rayos X

En las figura 4.15 y 4.16, se presentan los resultados obtenidos mediante difracción de rayos-X. Este análisis se realizó a los polvos antes de ser aplicados y tal como el proveedor los entrega.

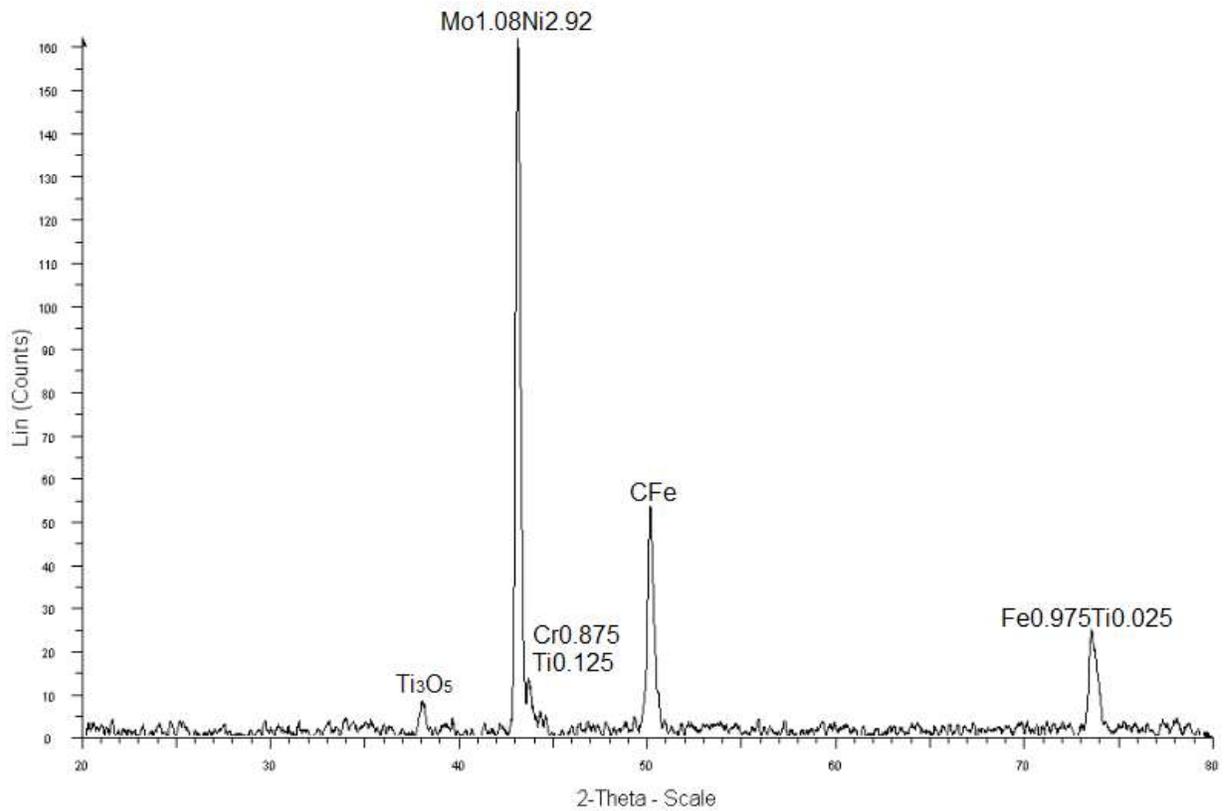


Figura 4.15. Difractograma de la aleación MetaCeram 21032S

Del análisis encontramos que los compuestos o fases presentes en los polvos son:

- Molibdeno Níquel (Mo_{1.08}Ni_{2.92})
- Carburo de hierro (CFe)
- Cromo Titanio (Cr_{0.875}Ti_{0.125})
- Hierro Titanio (Fe_{0.64}Ni_{0.36})
- Oxido de titanio (Ti₃O₅)
- Hierro Níquel (FeNi)

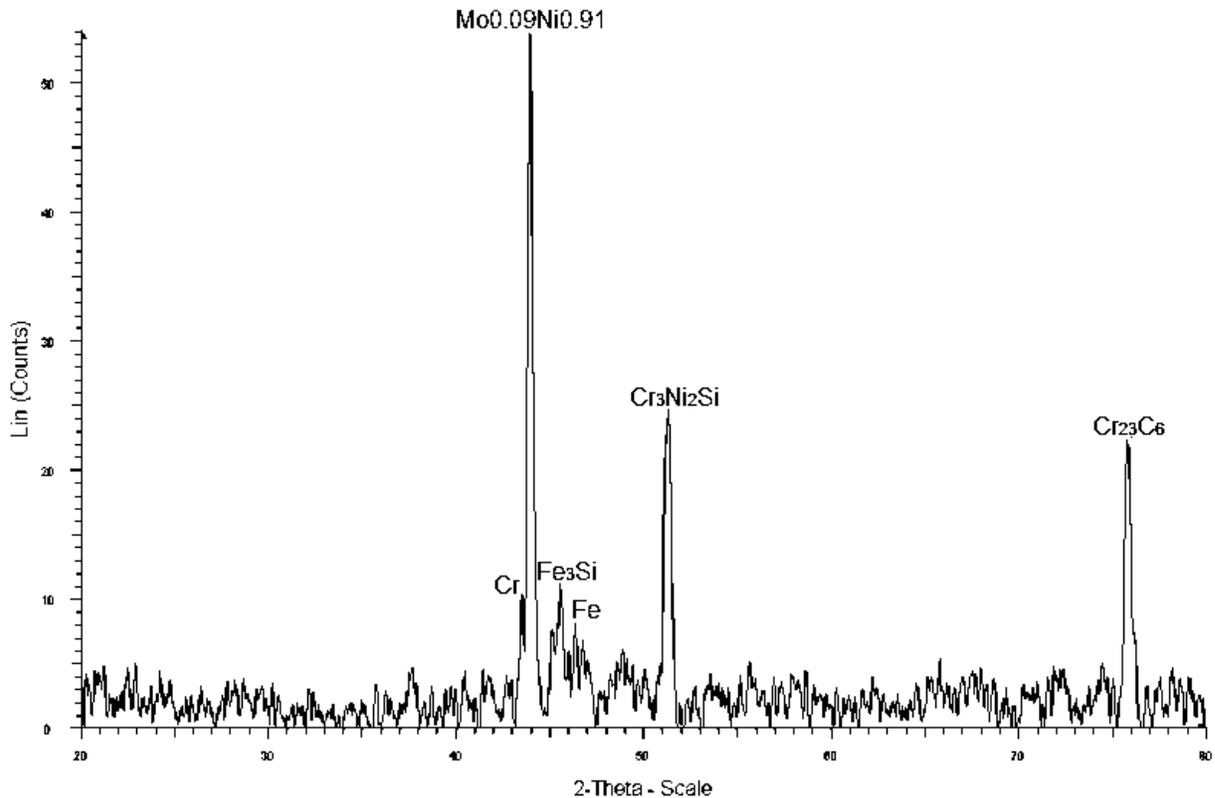


Figura 4.16. Difractograma de la aleación MetaCeram 23065

Del análisis encontramos que los compuestos o fases presentes en los polvos son:

- Molibdeno Níquel ($\text{Mo}_{0.09}\text{Ni}_{0.91}$)
- Cromo Níquel Silicio ($\text{Cr}_3\text{Ni}_2\text{Si}$)
- Carburo de cromo (Cr_{23}C_6)
- Hierro Silicio (Fe_3Si)
- Cromo (Cr)
- Hierro (Fe)

4.4 Análisis de los polvos por fluorescencia de rayos X

El ensayo de fluorescencia de rayos X es un buen análisis, aunque tiene sus limitaciones. Ya que ciertos elementos que se sabe están presentes en la aleación, no fueron detectados por esta técnica.

Del análisis realizado, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla VIII.

Tabla VIII. Composición química de las aleaciones

| | MetaCeram 21032S | MetaCeram 23065 |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
| Elemento presente | % en peso | |
| Ni | 29.74 | 46.23 |
| Fe | 15.47 | 2.64 |
| Mo | 17.64 | 3.59 |
| Na | 10.96 | 4.25 |
| Ti | 8.17 | - |
| W | 2.72 | - |
| Si | 0.79 | 3.69 |
| Cr | 0.60 | 11.5 |
| Mg | 0.40 | - |
| Ta | 0.26 | 0.84 |
| V | 0.19 | - |
| Cu | - | 1.45 |
| Yb | - | 0.67 |

En los resultados mostrados, solo se muestran los constituyentes con mayor porcentaje en peso. Existen otros elementos en cada aleación, pero su contenido es menor al 0.1 %. Cabe mencionar que los valores arrojados en este análisis son valores absolutos y no dependen el uno del otro para su cuantificación respecto al balance en peso total de la muestra.

4.5 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión realizado, se ejecutó a una velocidad de desplazamiento de 6 mm/min. Los datos obtenidos de dicho ensayo son mostrados en la tabla IX.

Tabla IX. Resultados obtenidos del ensayo de tensión de la fundición elaborada.

| Probeta | Resistencia a la tensión MPa | % de elongación | Módulo de elasticidad (GPa) |
|---------|------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| A | 163 | 3 | 24.1 |
| B | 174 | - | 28.2 |
| C | 176 | 0 | 27.3 |

Se realizó el ensayo de tensión a tres diferentes probetas de fundición gris, obteniéndose una resistencia a la tracción de aproximadamente 172 MPa para lograr la fractura del material. El módulo de elasticidad (E) calculado fue de 26.53 GPa y el porcentaje máximo de alargamiento fue del 3%.

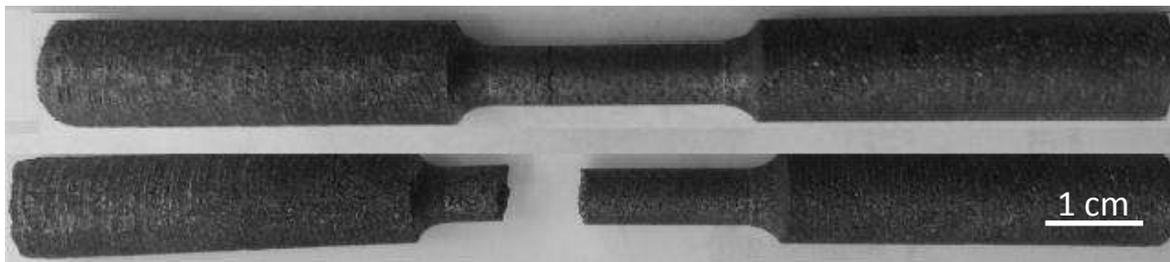


Figura 4.17. Probetas para ensayo de tensión.

Como era de esperarse la fundición gris posee una mínima ductilidad, que se ve reflejada en el diagrama esfuerzo deformación mostrado en la figura 4.18.

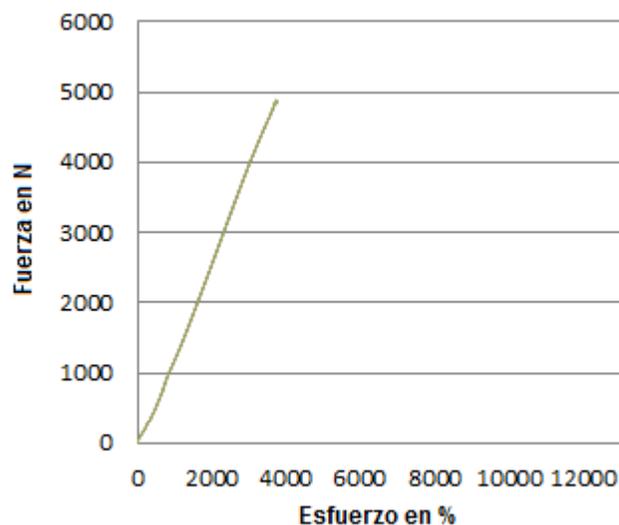


Figura 4.18. Gráfica esfuerzo - deformación de la fundición gris.

4.6 Ensayo de corte

Para el ensayo de corte se maquinaron las probetas con las dimensiones según la norma ASTM STP640. Un total de dieciocho probetas, nueve para cada tipo de recubrimiento. En la figura 4.19 se observan las probetas maquinadas de ambos recubrimientos.



Figura 4.19. Probetas para ensayo de corte a) MetaCeram 21032S b) MetaCeram 23065.

A primera vista, la probeta de la figura 4.19 b pareciera ser un poco más delgada y con una forma algo irregular. Debido al proceso de maquinado realizado en las probetas recubiertas con polvos fusibles, resulta complicado tener cierta precisión en las probetas. Cabe señalar que estas ligeras fluctuaciones en cuanto a dimensiones no son considerables para el ensayo realizado; ya que la zona que realmente es sometida al esfuerzo de corte, si cumple con las dimensiones requeridas.

Para conseguir las dimensiones finales de las probetas con recubrimiento de aleación MetaCeram 21032S fue empleado un torno con un buril de cobalto como herramienta de corte; mientras que para la aleación MetaCeram 23065 se tuvo que hacer el desbaste mediante discos abrasivos y una pulidora que fue adaptada a la torre de herramientas del mismo torno.

El ensayo de corte fue realizado en una maquina universal con una velocidad de desplazamiento utilizada fue de 1mm/min. La figura 4.20 muestra el ensamble entre el bloque de acero 9840 y las probetas recubiertas.



Figura 4.20. Ensamble entre el bloque de acero 9840 y las probetas recubiertas.

4.6.1 Ensayo de corte para recubrimiento MetaCeram 21032S

Los resultados obtenidos en el ensayo son mostrados en la tabla X y la figura 4.21.

Tabla X. Resultados del ensayo de corte, recubrimiento MetaCeram 21032S

| Espesor del recubrimiento | MetaCeram 21032S | F_{max} (N) | Resistencia al corte (MPa) |
|----------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 mm | Probeta 5 | 5530 | 63.671 |
| | Probeta 6 | 5940 | 87.681 |
| | Probeta 7 | 12500 | 171.230 |
| 2 mm | Probeta 9 | 12600 | 145.923 |
| | Probeta 31 | 5840 | 78.965 |
| | Probeta 32 | 7640 | 91.513 |
| 3 mm | Probeta 8 | 8890 | 103.814 |
| | Probeta 23 | 12400 | 128.883 |
| | Probeta 27 | 10200 | 147.848 |

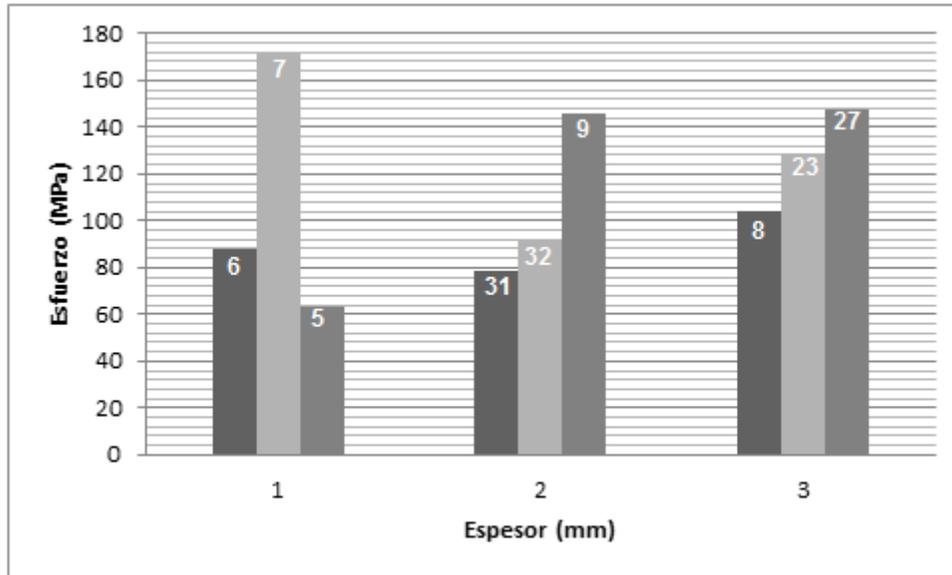


Figura 4.21. Gráfica de resultados del ensayo de corte del recubrimiento MetaCeram 21032S

Si tomamos en cuenta la mediana de cada uno de los grupos; es decir, 87, 91 y 128, entonces observamos un incremento del esfuerzo a medida que el espesor del recubrimiento incrementa.

Se puede observar cierta discrepancia entre cada grupo de los ensayos realizados. Esto pudiera ser atribuible a pequeñas diferencias en el proceso de maquinado y el mismo proceso de rociado térmico e inclusive pudiera deberse a la maquina donde se realizó el ensayo.

Un factor que sin duda interviene en la fuerza de adherencia entre el sustrato y el recubrimiento, es el grado de rugosidad. Sin embargo, la diferencia en rugosidad de 5 a 8 μm conferida por el papel abrasivo no es un factor que influya de manera considerable. Este rango de rugosidad no produce un efecto considerable [27]. En el desarrollo experimental realizado, el grado de rugosidad no fue uniforme en todas las probetas ya que se realizó manualmente bajo ciertas condiciones y es muy difícil mantener esa uniformidad con el simple lijado.

Lo que es realmente importante y debe destacarse, es el comportamiento que siguieron las probetas con recubrimiento; es decir, no se observa una tendencia clara o influencia demasiado notoria del espesor del recubrimiento sobre la resistencia al corte. Si bien existe

un escalonamiento entre la fuerza necesaria para romper el anillo entre los diferentes espesores, no es considerable ya que aún la resistencia al corte más pequeña que fue de 63 MPa resulta ser un valor bastante adecuado; comparado a los resultados obtenidos bajo la norma ASTM C633-79.

El caso de la probeta número 7 es notorio por el alto valor obtenido (171.23 MPa). Lo que pudiera deberse a motivos de preparación de las probetas e incluso irregularidades o fluctuaciones de la máquina con que se hizo el ensayo. Una explicación, pudiera ser una forma más precisa en cuanto a dimensiones entre la probeta y el bloque donde se apoyó para el ensayo. Si la carga fue distribuida uniformemente a lo largo de la periferia del anillo (es decir, quedó bien apoyada) tenemos como resultado una mayor resistencia, ya que los sensores de la máquina donde se realizó el ensayo son muy sensibles y se detiene el ensayo aunque solo una sección se halla desprendido. Esto se puede notar al comparar la forma de la fractura del recubrimiento. Las fracturas son mostradas en la figura 4.22.



Figura 4.22. a) Probeta 31, b) Probeta 7

4.6.2 Ensayo de corte para recubrimiento MetaCeram 23065S

Los resultados obtenidos en el ensayo, son mostrados en la tabla XI y figura 4.23.

Tabla XI. Resultados del ensayo de corte del recubrimiento MetaCeram 23065.

| Espesor del recubrimiento | MetaCeram 23065 | F _{max} (N) | Resistencia al corte (MPa) |
|---------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1 mm | Probeta 10 | 18000 | 283.261 |
| | Probeta 20 | 12200 | 190.348 |
| | Probeta 18 | 14700 | 223.412 |
| 2 mm | Probeta 16 | 19700 | 248.713 |
| | Probeta 40 | 22600 | 313.750 |
| | Probeta 13 | 18100 | 292.510 |
| 3 mm | Probeta 46 | 32500 | 451.099 |
| | Probeta 42 | 25700 | 397.500 |
| | Probeta 38 | 22500 | 328.918 |

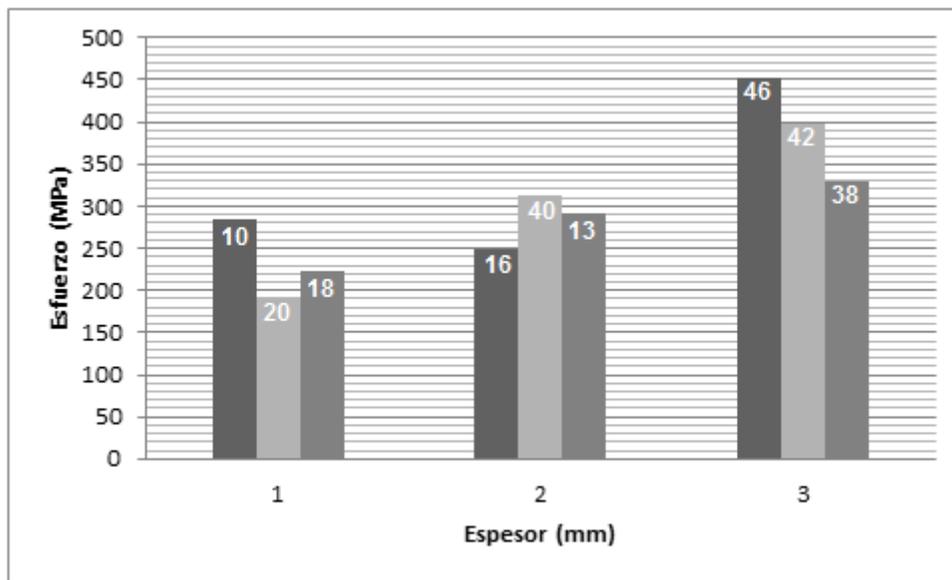


Figura 4.23. Gráfica de resultados del ensayo de corte, recubrimiento MetaCeram 23065

Si tomamos en cuenta la mediana de cada uno de los grupos; es decir, 223, 292 y 397, entonces observamos un incremento del esfuerzo a medida que el espesor del recubrimiento incrementa.

Los resultados obtenidos con este tipo de recubrimiento no muestran una gran disparidad entre cada grupo de ensayos realizados a los diferentes espesores. Es evidente que mientras

se incrementa el espesor, también es necesaria una fuerza superior que haga vencer la fuerza de adhesión entre el recubrimiento y la fundición.

La explicación a este fenómeno puede deberse a pequeñas irregularidades en el maquinado del anillo; que a su vez conllevan a una concentración de la carga aplicada en un sector específico de la interfaz del recubrimiento. Al existir una mayor área de apoyo (en el caso de los espesores más gruesos), habrá una tendencia a una distribución de carga uniforme alrededor del anillo y por lo tanto una mayor resistencia al corte.

La figura 4.24 muestra dos de las probetas ensayadas. Se observa que en ambas (aunque así fue en todas las de este tipo de recubrimiento) existió una fractura total alrededor de la probeta; se desintegro en pequeños fragmentos el recubrimiento.

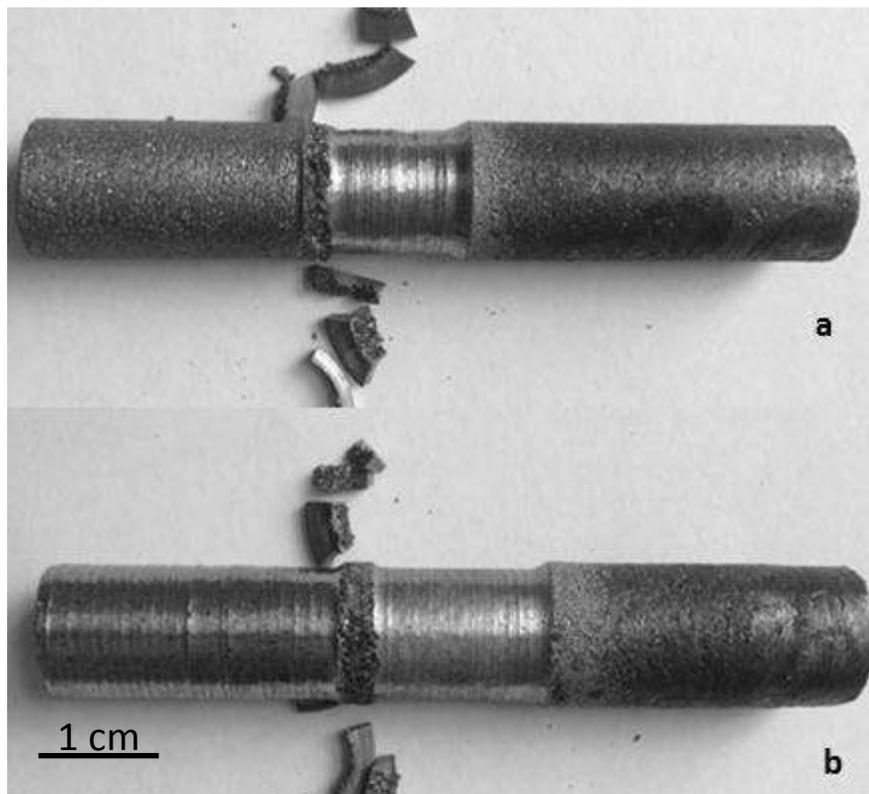


Figura 4.24. a) Probeta 20, b) Probeta 40

4.6.3 Comparativa del ensayo de corte entre ambos recubrimientos

De los resultados obtenidos, se observa una gran diferencia entre la fuerza necesaria para hacer fallar el recubrimiento MetaCeram 23065 en comparación al MetaCeram 21032S.

Esto indica, que la resistencia al corte está claramente influenciada por el tipo de recubrimiento utilizado y las condiciones bajo las que se aplica.

La generación de esfuerzos residuales no es lo suficientemente grande como para influenciar los mecanismos de adhesión presentes en la unión sustrato-recubrimiento. Al menos no en el rango de espesores estudiados.

Esto es debido a la propia naturaleza del recubrimiento; es decir, al tipo de elementos que los constituyen. La adición de ciertos elementos o compuestos, tales como el cromo, titanio o tungsteno; sin duda son un factor determinante en los resultados obtenidos. La aparición de segundas fases, como lo son los carburos de cromo en el recubrimiento, embebidos en gran número en la matriz de níquel, sin duda son los responsables de la alta dureza obtenida.

Otra diferencia es la forma de la fractura. Mientras en el MetaCeram 21032S el anillo casi se conserva completo o en fragmentos grandes; el MetaCeram 23065 se secciona por completo en pequeños pedazos. Esta situación es atribuida a la diferencia en cuanto a dureza de los recubrimientos, su fragilidad y la unión metalúrgica del recubrimiento. La dureza aproximada del MetaCeram 23065 ronda los 55 HRC, el MetaCeram 21032S está sobre 32 HRC. Recordando que un material mientras más duro, será más frágil es que se puede comprender este hecho.

4.7 Ensayo de dureza

Del ensayo de dureza realizado, se obtuvieron resultados mostrados en la tabla XII.

Tabla XII. Resultados del ensayo de dureza

| Aleación 21032S | Aleación 23065 |
|----------------------------|---------------------------|
| HRC | HRC |
| 43 | 67 |
| 44 | 60 |
| 51 | 66 |
| 45 | 64 |

Para la aleación 21032S, tenemos un promedio aproximado de dureza de 45 HRC. Mientras que para la aleación 23065, el promedio de dureza fue de 64 HRC.

Los altos valores de dureza observados en los recubrimientos, son atribuidos a la existencia de una capa de óxido y carburos respectivamente. Esto se corrobora en el análisis realizado mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

4.8 Ensayo de desgaste

El ensayo de desgaste fue realizado en una maquina perno en anillo, con una contracara de acero rápido grado herramienta M2 tratado térmicamente. La razón por la cual es usada este tipo de contra cara, es su alta dureza; cuyo valor ronda los 60 HRC, mientras que el material a ensayar es de aproximadamente 32 HRC (MetaCeram 21032S) y 55 HRC (MetaCeram 23065).

Para tener resultados aceptables es necesario que la contra cara supere en dureza al material a ensayar, de lo contrario el elemento desgastado sería la contra cara; que idealmente no debería sufrir desgaste.

La realización del ensayo de desgaste se llevó a cabo preparando la contracara con papel abrasivo desde grado 1200 hasta 2000; a fin de mantener una superficie de contacto lisa que contribuya a la obtención de buenos resultados. Dicha preparación de la contracara se hizo sistemáticamente después de cada tres pruebas.

4.8.1 Ensayo de desgaste para la fundición gris

A manera de tener un parámetro de comparación entre una fundición gris y los recubrimientos aplicados, se realizó un ensayo de desgaste a tres probetas de fundición gris bajo las mismas condiciones y dimensiones que las mejoradas con los recubrimientos.

La tabla XIV y figura 4.25, muestran los resultados del ensayo de desgaste.

Tabla XIII. Resultados del ensayo de desgaste, Fundición gris

| Fundición gris | | | | |
|----------------|-----------|------------------|----------------|---------------|
| No. Probeta | Carga (N) | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Dif. Peso (g) |
| A | 52.6 | 7.88593 | 7.81968 | 0.06625 |
| B | 103.5 | 7.79484 | 7.72336 | 0.07148 |
| C | 154.4 | 9.84262 | 9.55017 | 0.29245 |

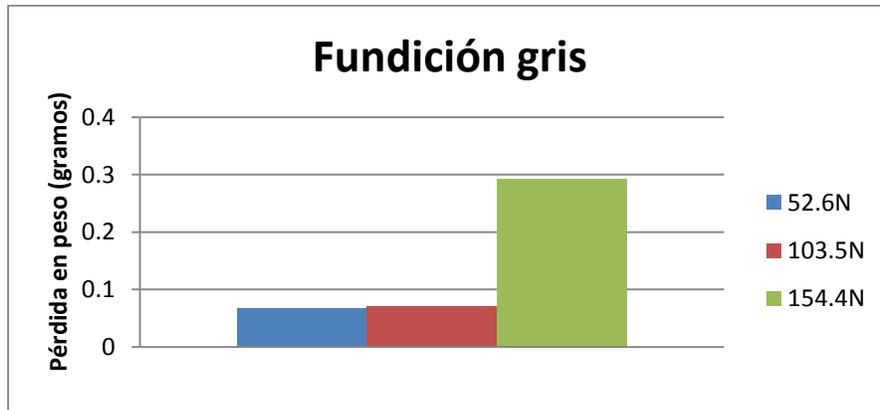


Figura 4.25. Gráfica de resultados del ensayo de desgaste, Fundición.

La pérdida de material observada en el ensayo realizado a la fundición sin recubrimiento, pudieramos decir que en el rango de 52.6 a 103.5 N permanece constante; es decir, la carga es bien tolerada por la fundición sin que exista un desgaste excesivo.

La probeta ensayada a la carga máxima en este experimento, muestra una clara pérdida de material cuando las probetas son sometidas al desgaste en seco bajo una carga de 154.4 N.

Con este comportamiento, comprobamos la transición de desgaste ligero a severo bajo ciertas condiciones de trabajo; siendo la tasa de desgaste mucho mayor en la fundición sin recubrimiento comparada al desgaste en la probeta con recubrimiento, bajo las mismas condiciones de trabajo.

Aún si comparamos el desgaste más pequeño de la fundición sin recubrimiento al resto de las probetas que tienen recubrimiento, se puede observar que está en la mayoría de los casos por encima de los valores obtenidos con las probetas recubiertas.

La figura 4.26 muestra el coeficiente de fricción de las probetas de fundición gris ensayadas. Se observa una disminución en el coeficiente de fricción a medida que se incrementa la carga aplicada; esto se atribuye al incremento de temperatura producto del contacto entre la probeta y la contra cara.

El grafito también juega un factor importante; ya que a una mayor carga el grafito desprendido hace más sencillo el deslizamiento entre la pieza a desgastar y la contra cara.

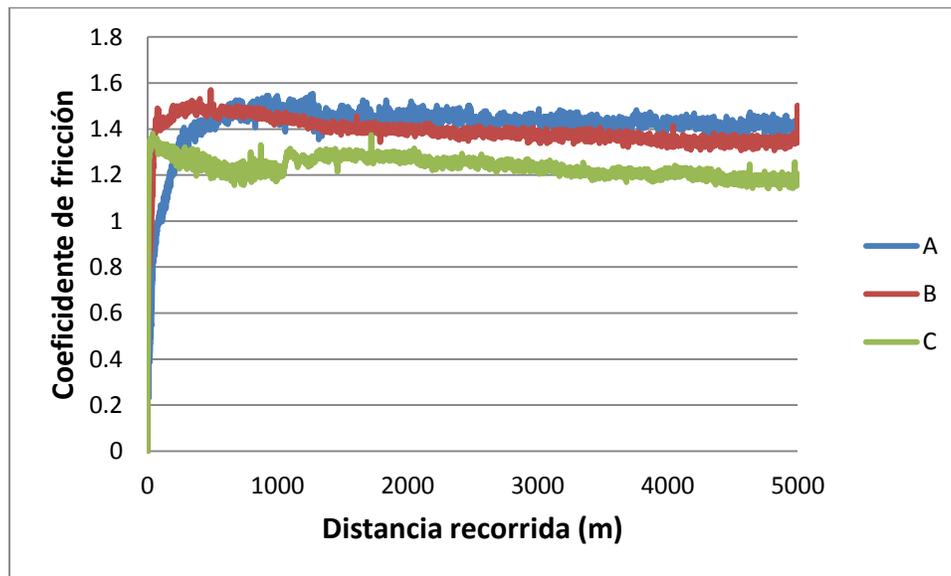


Figura 4.26. Grafica del coeficiente de fricción de las probetas de fundición gris sin recubrimiento A, B y C (52.6, 103.5 y 154.4 N respectivamente)

4.8.2 Ensayo de desgaste para el recubrimiento MetaCeram 21032S

La tabla XII y la figura 4.27 mostradas a continuación, revelan los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Tabla XIV. Resultados del ensayo de desgaste, MetaCeram 21032S

| MetaCeram 21032S | | | | | |
|-------------------------|-------------|-----------|------------------|----------------|---------------|
| | No. Probeta | Carga (N) | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Dif. Peso (g) |
| 1mm | 34 | 52.6 | 8.47411 | 8.45096 | 0.02315 |
| | 21 | 103.5 | 8.71174 | 8.66519 | 0.04655 |
| | 25 | 154.4 | 9.88779 | 9.81529 | 0.0725 |
| 2mm | 29 | 52.6 | 10.24072 | 10.21739 | 0.02333 |
| | 28 | 103.5 | 11.14268 | 11.094 | 0.04868 |
| | 33 | 154.4 | 11.3034 | 11.23228 | 0.07112 |
| 3mm | 22 | 52.6 | 10.73595 | 10.70236 | 0.03359 |
| | 30 | 103.5 | 12.15751 | 12.10453 | 0.05298 |
| | 26 | 154.4 | 10.61898 | 10.55061 | 0.06837 |

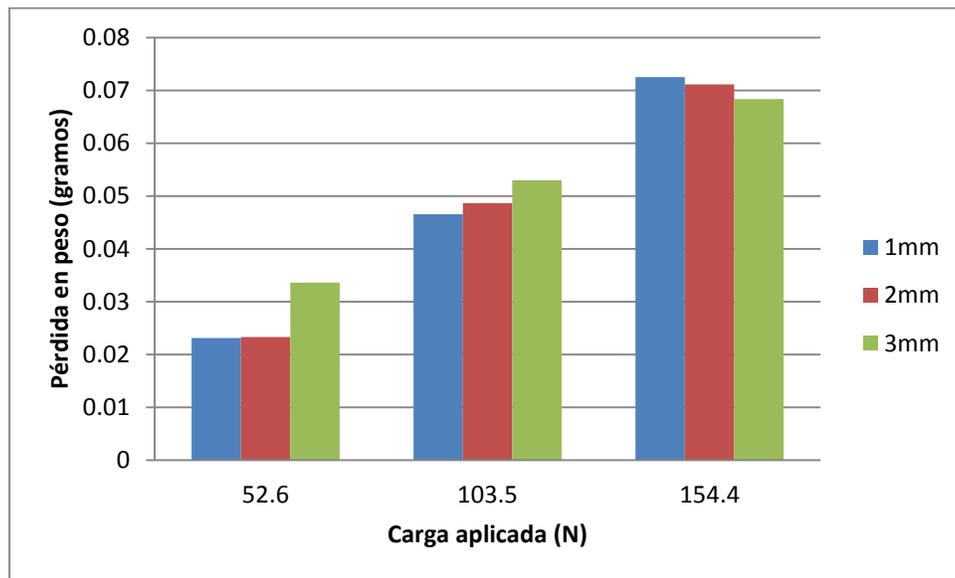


Figura 4.27. Gráfica de resultados del ensayo de desgaste del recubrimiento MetaCeram 21032S

El análisis del ensayo de desgaste se realizó con base a la pérdida de material de cada una de las probetas previamente pesadas en una balanza analítica. La pérdida de peso es un buen parámetro para determinar qué tanto daño es producido por el desgaste.

Se observa una clara tendencia al desgaste del recubrimiento a medida que se incrementa la carga aplicada; sin embargo, el espesor del recubrimiento no es un factor que influya en la pérdida de material.

En la figura 4.28 se muestra una probeta antes y después de ser sometida al ensayo de desgaste.

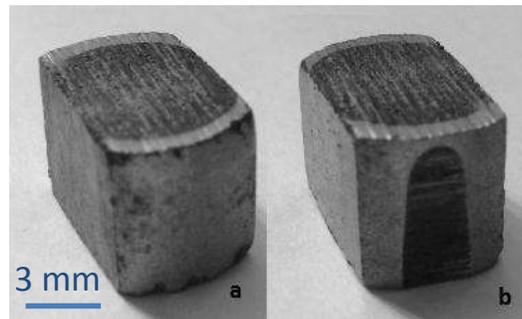


Figura 4.28. Probeta 28 a) Antes del desgaste b) Después del desgaste

El grado de adherencia resultó ser suficientemente bueno entre los dos materiales, ya que en todas las pruebas se mantuvieron unidos sin presentar desprendimiento de material excesivo.

Otro resultado importante obtenido del ensayo de desgaste son las gráficas del coeficiente de fricción. Se observa una disminución en el coeficiente de fricción a medida que la carga es incrementada; esto se atribuye al incremento en la temperatura debido al roce de las superficies en contacto. La figura 4.29 muestra el coeficiente de fricción de las probetas 29, 28 y 33.

De la gráfica mostrada en la figura 4.29, la zona de interés para este estudio es la parte donde el comportamiento se ha estabilizado. Ya que las fluctuaciones iniciales son debidas a factores como el acabado superficial tanto de la pieza que ha sido recubierta como de la contracara, y la magnitud de la carga que está siendo aplicada en combinación con la velocidad de giro del equipo

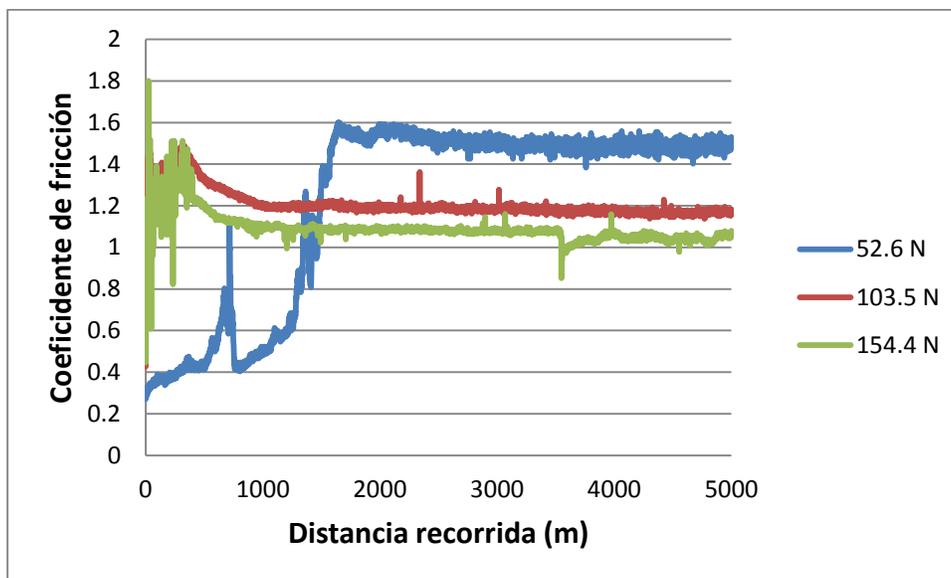


Figura 4.29. Grafica del coeficiente de fricción de las probetas 29, 28 y 33 (52.6, 103.5 y 154.4 N respectivamente)

4.8.3 Ensayo de desgaste para el recubrimiento MetaCeram 23065

La tabla XI y la figura 4.30 mostradas a continuación, revelan los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Tabla XV. Resultados del ensayo de desgaste, MetaCeram 23065

| MetaCeram 23065 | | | | | |
|------------------------|-------------|-----------|------------------|----------------|---------------|
| | No. Probeta | Carga (N) | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Dif. Peso (g) |
| 1mm | 9 | 52.6 | 9.47809 | 9.45975 | 0.01834 |
| | 50 | 103.5 | 10.53264 | 10.49943 | 0.03321 |
| | 45 | 154.4 | 10.22658 | 10.17606 | 0.05052 |
| 2mm | 44 | 52.6 | 10.86734 | 10.85424 | 0.0131 |
| | 49 | 103.5 | 11.2049 | 11.17209 | 0.03281 |
| | 48 | 154.4 | 12.16676 | 12.11287 | 0.05389 |
| 3mm | 45b | 52.6 | 10.77997 | 10.758 | 0.02197 |
| | 41 | 103.5 | 9.36014 | 9.32865 | 0.03149 |
| | 47 | 154.4 | 10.87057 | 10.82631 | 0.04426 |

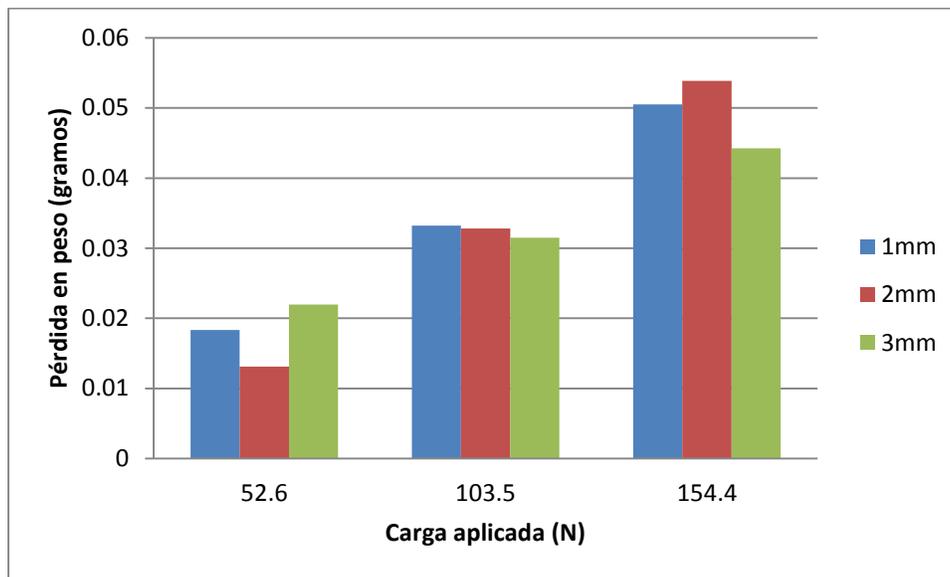


Figura 4.30. Gráfica de resultados del ensayo de desgaste del recubrimiento MetaCeram 21032S

El desgaste producido bajo una misma carga a tres probetas diferentes es prácticamente el mismo, siendo que la diferencia entre las probetas es únicamente el espesor del recubrimiento. Este comportamiento está regido para todas las cargas aplicadas en este estudio.

La probeta número 48 muestra una pérdida de material por arriba de las otras probetas que fueron ensayadas bajo las mismas condiciones. Hay una diferencia marcada en el ensayo con carga de 154.4 N. Aquí parece que el espesor si tiene influencia en la pérdida de material, aunque realmente la diferencia es de 0.02g, es pequeña y pudiera no ser relevante. Esto pudiera deberse a pequeñas fluctuaciones con el equipo utilizado o una preparación un poco diferente de la probeta.

La figura 4.31, muestra una probeta antes y después de ser sometida al ensayo de desgaste.

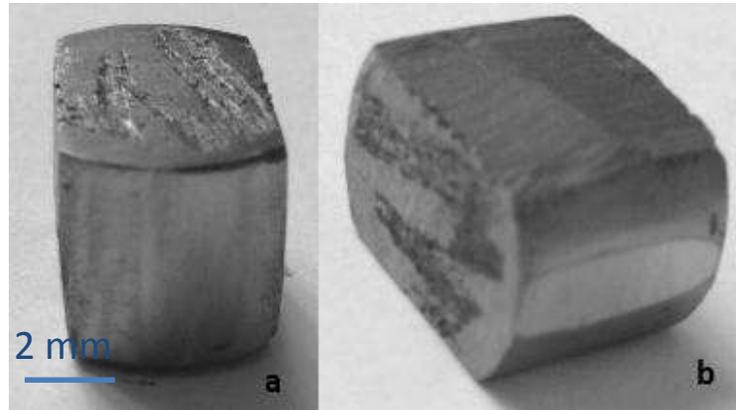


Figura 4.31. Probeta 48 a) Antes del desgaste b) Después del desgaste

Para este recubrimiento, se puede observar primero un incremento en el coeficiente de fricción para después tener una disminución. Primero sube a consecuencia de la carga aplicada e impulsado por las irregularidades presentes aún en la superficie y después baja un poco debido al del incremento en la temperatura. La figura 4.32 muestra el coeficiente de fricción de las probetas 9, 50 y 45.

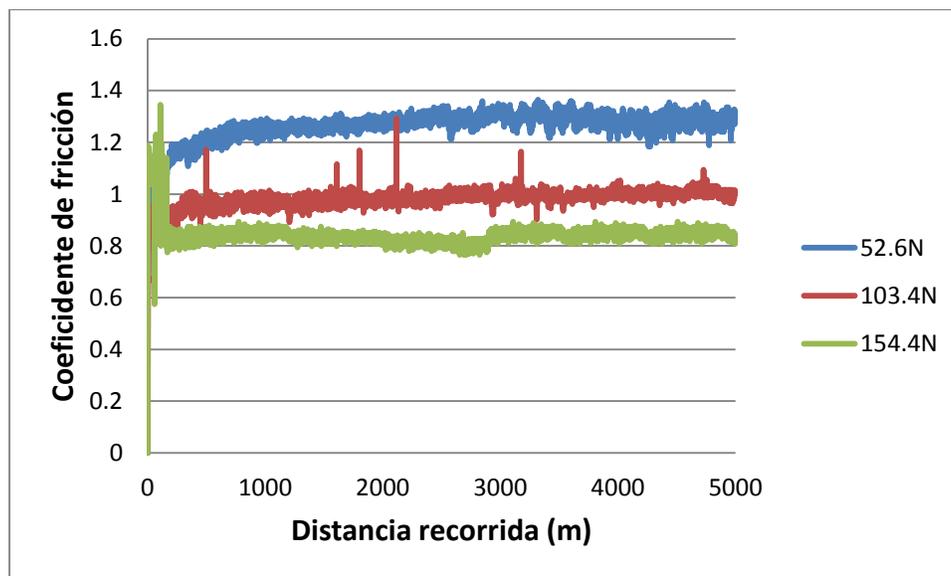


Figura 4.32. Grafica del coeficiente de fricción de las probetas 9, 50 y 45 (52.6, 103.5 y 154.4 N respectivamente)

4.8.4 Comparativa del ensayo de desgaste entre ambos recubrimientos

El comportamiento que se presentó en los ensayos de los diferentes recubrimientos, es muy similar el uno del otro. La diferencia notable es la pérdida de peso bajo las mismas condiciones del ensayo. El MetaCeram 21032S se desgasta más en comparación al MetaCeram 23065; este comportamiento es atribuido a la dureza del recubrimiento. La figura 4.33, muestra probetas con los 2 diferentes tipos de recubrimiento.



Figura 4.33. a) MetaCeram 21032S, b) MetaCeram 23065

Dicha diferencia en cuanto a la pérdida de material, es notable en la huella de desgaste de la pieza. También se pueden observar las ligeras rayaduras producto del contacto entre las piezas.

En los dos recubrimientos y por las pequeñas marcas en forma de rayaduras que quedaron en las probetas, se puede decir que el tipo de desgaste presente es desgaste abrasivo. Este desgaste es por indentación, o penetración de una partícula dura en un material de dureza inferior y un deslizamiento.

Las diferencias encontradas en las gráficas del coeficiente de fricción son debidas a las propiedades térmicas de conducción del recubrimiento; ya que la temperatura es un factor determinante para tener un coeficiente de fricción específico.

CONCLUSIONES

1. El grado de adherencia resultó ser suficientemente bueno entre los dos materiales, ya que según los valores obtenidos, al incrementar el espesor no se pierde fuerza de adherencia.
2. La generación de esfuerzos residuales en los sistemas analizados, no son lo suficientemente grandes como para influenciar los mecanismos de adhesión presentes en la unión sustrato-recubrimiento.
3. En el ensayo de desgaste, todas las probetas se mantuvieron íntegras sin presentar desprendimiento de material excesivo. Demostrando con esto una adecuada fuerza de cohesión entre las partículas proyectadas.
4. Se observa una clara tendencia al desgaste del recubrimiento a medida que se incrementa la carga aplicada; sin embargo, el espesor del recubrimiento no es un factor que influya en la pérdida de material.
5. En los dos recubrimientos y por las pequeñas marcas en forma de ralladuras que quedaron en las probetas, se puede decir que el tipo de desgaste presente es desgaste abrasivo.
6. La existencia de carburos de cromo en la aleación 23065, trae como consecuencia una alta dureza en el recubrimiento. Esta fue medida y alcanzó un valor promedio de 64 HRC.
7. Se identificó la fase de óxido de titanio en la aleación 21032S, misma que confiere una alta dureza al recubrimiento; la cual es 45.7 HRC en promedio.
8. Mediante el proceso de rociado térmico por flama con polvos fusibles se obtiene una mayor dureza en el recubrimiento que con los polvos no fusibles.
9. El proceso de rociado térmico por flama será aplicado con éxito solo si se considera la interacción entre si de todas las variables del proceso durante la ejecución del recubrimiento; ya que ésta interacción determinará las propiedades químicas, mecánicas y físicas de dicho recubrimiento.
10. Resultó ser más complicado maquinar las probetas recubiertas con la aleación MetaCeram 23065, esto se atribuye a la muy alta dureza conseguida. De aquí se recomienda la aplicación del recubrimiento no excesiva; es decir, ajustando lo más posible a la dimensión final requerida.

11. Las probetas con recubrimiento ensayadas presentan una tasa de desgaste mucho menor que las probetas sin recubrimiento; sustentando así la viabilidad del uso de este tipo de recubrimientos.

APÉNDICE

Existe un mecanismo que describe cómo interactúan los esfuerzos residuales y el espesor del recubrimiento para contribuir a la disminución de adherencia; este comportamiento se llama "efecto de borde libre" (free-edge effect) [26] y ocurre en el desprendimiento de materiales compuestos laminados.

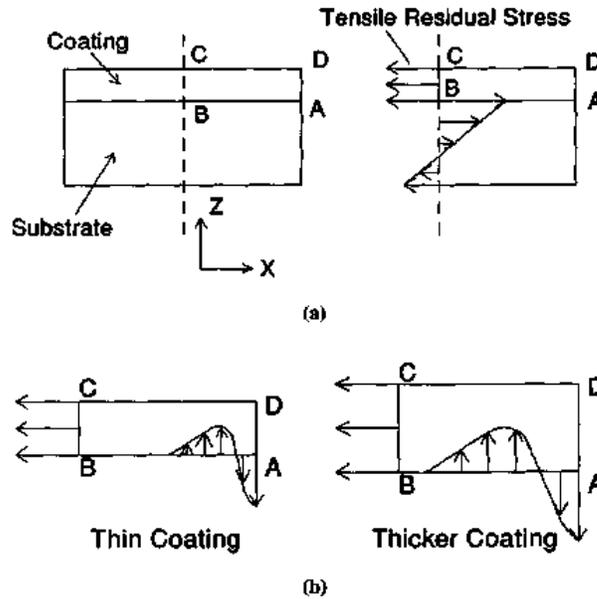


Figura 13. Efecto del espesor del recubrimiento y los esfuerzos residuales de tensión en borde libre

La fig. 13a, muestra un diagrama de cuerpo libre de tensiones residuales en una muestra revestida. La fig. 13b, muestra esfuerzos residuales de tensión, en la dirección x, para una capa delgada y una más gruesa. Se asume en este análisis que la magnitud de los esfuerzos residuales en las dos capas es el mismo, aunque las tensiones residuales pueden modificarse hasta cierto punto por la selección de los parámetros de proyección térmica. El efecto de borde libre, es una distribución de esfuerzos en la dirección z con tensión en el borde y compresión lejos del borde. La distribución de esfuerzo σ_z satisface el equilibrio para el diagrama de cuerpo libre.

Dos características son importantes en la distribución de esfuerzos, el momento de equilibrio respecto al punto B en la fig. 13b, para un recubrimiento delgado requiere que la

distribución de esfuerzos sea de tensión en el borde libre. Y si la capa es más gruesa y los esfuerzos residuales no cambian, el momento causado por los esfuerzos residuales es mayor. Por lo tanto, debe aumentar la distribución de esfuerzos de σ_z para equilibrar este momento mayor. El resultado es un esfuerzo de tensión σ_z mayor en el borde, para la capa más gruesa. La conclusión es que la capa más gruesa provoca mayores esfuerzos de tensión en los bordes e incrementa la tendencia al desprendimiento y por lo tanto reduce el esfuerzo aplicado requerido para causar dicho desprendimiento[26].

Con el análisis del efecto de borde libre, tenemos una idea más clara de la influencia del espesor de un recubrimiento sobre la fuerza de adherencia. Aunque este análisis es sobre materiales compuestos, puede ser aplicado para comprender la interacción de los esfuerzos existentes entre el sustrato y el recubrimiento.

REFERENCIAS

- [1]. Pagnola M. RECUBRIMIENTOS POR THERMAL SPRAY. *Thermal Spray*,
- [2]. Riahi AR y Alpas AT. Wear map for grey cast iron. *Wear*, 255(1–6), 401-409. 2003.
- [3]. Kumar RL. Welding grey iron with mild steel electrodes. *Foundry*, 1968.
- [4]. Pouranvari M. On the weldability of grey cast iron using nickel based filler metal. *Materials & Design*, 31(7), 3253-3258. 2010.
- [5]. Chandra S y Fauchais P. Formation of Solid Splats During Thermal Spray Deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(2), 148-180. 2009.
- [6]. Wang YY, Li CJ y Ohmori A. Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings. *Thin Solid Films*, 485(1–2), 141-147. 2005.
- [7]. Weiss H. Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment. *Surface and Coatings Technology*, 1995.
- [8]. A. Itoh KT, M. Itoh, and M. Koga. Pretreatments of Substrates by Using Reversed Transferred Arc in Low Pressure Plasma Spray. *Thermal Spray: Research and Applications*, 245-252. 1991.
- [9]. Morks MF, Tsunekawa Y, Okumiva M y Shoeib MA. Splat morphology and microstructure of plasma sprayed cast iron with different preheat substrate temperatures. *Journal of Thermal Spray Technology*, 11(2), 226-232. 2002.
- [10]. Mellali M, Grimaud A, Leger AC, Fauchais P y Lu J. Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation. *Journal of Thermal Spray Technology*, 6(2), 217-227. 1997.
- [11]. Li C-J y Li J-L. Evaporated-gas-induced splashing model for splat formation during plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 184(1), 13-23. 2004.
- [12]. Villar CM. Thermal Spray. *Tratamientos*, 2008.
- [13]. Albert JG, *Thermal Spraying Technology and Applications*. Washington, DC: 1999.
- [14]. AWS, *WELDING HANDBOOK. Eighth*. 1991.
- [15]. POSADA BA. *PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN SALES FUNDIDAS DE UN ACERO POR ROCIADO TÉRMICO CON UNA ALEACIÓN NÍQUEL – CROMO EN EL RANGO DE TEMPERATURA DE 500 °C – 650 °C*. AREA DE MATERIALES, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, Pereira, Colombia. 2007

- [16]. Dunkey AJYaJJ, *Atomization of Melts: For Powder Production and Spray Deposition* Clarendon Press. 1994.
- [17]. Hutchings IM. *Friction and Wear of Engineering Materials*. 1992.
- [18]. Andrade ER. *Estudio Tecnológico del Rociado Termico Para el Desarrollo de una Metodología de Caracterización de Recubrimientos Base níquel*. Ingeniero Soldadura, UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO, Morelia. 2001
- [19]. Glogović Z, Kožuh Z y Kralj S. A Mathematical Model for the Calculation of the Adhesion of a Flame Sprayed Coating of Aluminum on S 235 JR Steel. *Journal of Thermal Spray Technology*, 21(1), 63-76. 2012.
- [20]. Enginners DOAUSACO, *Thermal Spraying: New Construction and Maintenance*. BiblioBazaar. 2013.
- [21]. Unger RH y Grossklaus WD. A Comparison of the Technical Properties of Arc Sprayed Versus Plasma Sprayed Nickel-5 Aluminum. 1993.
- [22]. Howell KM. Evaluating Bond Strength of Metal Coatings over Concrete Surfaces. *Mater. Prop.*, 31(7), 29-32. 1992.
- [23]. Woods ME. Thermal Fatigue Rig Testing of Thermal Barrier Coatings for Internal Combustion Engines,. *Thermal Spray Technology--New Ideas and Processes*, 245-253. 1988.
- [24]. Marynowski CW, Halden FA y Farley EP. Variables in Plasma Spraying, *Electrochem. Technol*, 3(1965).
- [25]. Rybicki EE y Stonesifer RB. Analysis for the Effects of Weld Repair Induced Residual Stresses on the Fracture of the HSST. *Pressure Vessel Technol*, 102(318-323). 1980.
- [26]. Greving DJ, Shadley JR, Rybicki EF, Greving DJ, Shadley JR y Rybicki EF. Effects of coating thickness and residual stresses on the bond strength of ASTM C633-79 thermal spray coating test specimens. *Journal of Thermal Spray Technology*, 3(4), 371-378. 1994.
- [27]. Lima CRC y Guilemany JM. Adhesion improvements of Thermal Barrier Coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. *Surface and Coatings Technology*, 201(8), 4694-4701. 2007.
- [28]. Stokes J y Looney L. Residual stress in HVOF thermally sprayed thick deposits. *Surface and Coatings Technology*, 177-178(0), 18-23. 2004.

- [29]. Rodríguez J, Martín A, Fernández R y Fernández JE. An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings. *Wear*, 255(7–12), 950-955. 2003.
- [30]. Kahraman N y Gülenç B. Abrasive wear behaviour of powder flame sprayed coatings on steel substrates. *Materials & Design*, 23(8), 721-725. 2002.
- [31]. Harris AF y Beevers A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19(6), 445-452. 1999.
- [32]. Godoy C, Souza EA, Lima MM y Batista JCA. Correlation between residual stresses and adhesion of plasma sprayed coatings: effects of a post-annealing treatment. *Thin Solid Films*, 420–421(0), 438-445. 2002.
- [33]. Hashmi MSJ, Pappalettere C y Ventola F. Residual stresses in structures coated by a high velocity oxy-fuel technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 75(1–3), 81-86. 1998.
- [34]. Maranhão O, Rodrigues D, Boccalini M y Sinatorá A. Bond Strength of Multicomponent White Cast Iron Coatings Applied by HVOF Thermal Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(4), 708-713. 2009.
- [35]. Pershin V, Lufitha M, Chandra S y Mostaghimi J. Effect of substrate temperature on adhesion strength of plasma-sprayed nickel coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 12(3), 370-376. 2003.
- [36]. J. Pech BH, L. Bianchi. Study of Oxide Layers Obtained onto 304L Substrate Heated by a DC Plasma Jet. *Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances*, 8(775 - 782). 1998.
- [37]. ASTM, ASTM E8M-04: 2002. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*.