ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

"ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE METALIZACIÓN POR HVOF DE UN EJE DE ACERO INOXIDABLE DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA"

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

YÁNEZ MONTEZUMA OMAR RAMIRO
omar.yanez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO
homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Yánez Montezuma Omar Ramiro**, bajo mi supervisión.

Ing. Homero Barragán
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Yánez Montezuma Omar Ramiro**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Yánez Montezuma Omar Ramiro

DEDICATORIA

A mi madre Lourdes a pesar de su carácter, ella es mi persona especial, por ser figura de templanza en mí, en la adversidad de las situaciones ella sabe cómo mantener la calma, a pesar de los tiempos críticos y condiciones, ella siempre da la tranquilidad al final de la tormenta. Gracias por sus años de vida dedicada a mí, van todos mis esfuerzos hasta el último día que Dios me dé.

A mis hermanos Francis y Yessenia, a ellos por ser el motor de mi inspiración, a ellos por estar ahí siempre apoyándome en todas las circunstancias.

A mi abuelita, a mis primas Katherine, Diana, Azucena, a mis tíos y a toda mi familia, por mantener el cariño, la confianza, la fe en mí y saber que no los defraudé.

A mis amigos y conocidos que a pesar de los años están ahí, por todos esos buenos consejos y experiencia compartida, personas buenas que han entrado a mi vida para aportar cosas nuevas y de provecho, a ellos mi completad gratitud.

A ti, error de mi vida, momentos que son difícil de evitarlos, errores que me hicieron más fuerte y templaron mi carácter. Aclaro, no es gracias ti error como forme mi carácter, si no a la capacidad que hay en mi de recuperarme y mejorar. Gracias a mí y la confianza que me tengo en superar cualquier adversidad.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por darme el motor principal que es la vida para proponerme cualquier meta y cumplirla, a mis hermanos Francis y Yessenia por su apoyo incondicional.

A mi director de tesis, Ing. Homero Barragán, por guiarme en el desarrollo del proyecto de investigación y tener la disponibilidad total.

Al personal de ITMECA CIA. LTDA, en especial al Ing. Juan Carlos Araujo Gerente General, por las facilidades prestadas para la culminación de la investigación del proyecto.

Al personal del laboratorio de Ciencias e Ingeniería de la Universidad San Francisco de Quito, al Decano Alfredo Valarezo, Ph.D. por la realización de los ensayos de adherencia, ensayo de dureza de microindentación y los análisis metalográficos para el proyecto de investigación.

Al Ing. Marco León Coordinador del laboratorio de Metalografía de la Universidad San Francisco de Quito, por el apoyo incondicional en el desarrollo de los ensayos metalográficos del proyecto de investigación.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN i
DECLARACIÓN ii
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTOS iv
ÍNDICE DE FIGURAS viii
ÍNDICE DE TABLAS x
ÍNDICE DE ANEXOS xii
RESUMEN xiv
ABSTRACT xv
INTRODUCCIÓN 1
Pregunta de Investigación 2
Objetivo general 2
Objetivos específicos 2
Alcance 2
1. MARCO TEÓRICO 3
1.1. Introducción 3
1.2. Proceso de metalizado 3
1.2.1. Definición de metalizado 3
1.2.2. Generalidades del proceso de metalizado 4
1.2.3. Sustrato 4
1.2.4. Splat 5
1.2.5. Clasificación de los procesos y técnicas de metalizado 6
1.2.6. Proceso de metalizado con llama 6
1.2.7. Aplicaciones para el proceso de metalización 7
1.3. Proceso de metalizado por HVOF 9
1.3.1. Reseña histórica 9
1.3.2. Principios 9
1.3.3. Equipos y elementos para el proceso HVOF 11
1.3.4. Parámetros principales del proceso HVOF 12
1.3.5. Recubrimientos para el proceso HVOF 12
1.4. Bomba centrífuga 14
1.4.1. Bomba centrífuga Tipo W, serie 178 15
1.4.2. Especificación del eje de la bomba centrífuga 15
1.4.3. Desgastes que se producen en el eje de la bomba centrífuga 16
1.5. Aceros inoxidables 17
1.5.1. Descripción de los aceros inoxidables 17

1.5.2. Aceros Inoxidables Martensíticos 17
1.5.3. Diagrama Hierro-Cromo-Carbono 19
1.5.4. Acero Inoxidable Martensítico 416 19
2. METODOLOGÍA 22
2.1. Introducción 22
2.2. Metodología experimental del proceso HVOF 23
2.3. Preparación de la superficie 23
2.3.1. Codificación para las probetas. 24
2.3.2. Limpieza 29
2.3.3. Enmascaramiento 32
2.3.4. Granallado 33
2.3.5. Perfil de anclaje. 38
2.4. Metalizado por HVOF 41
2.4.1. Montaje de las probetas para metalizar 41
2.4.2. Proceso previo para aplicar HVOF 42
2.4.3. Equipo para el metalizado por HVOF 46
2.4.4. Parámetros del proceso HVOF 47
2.4.5. Control de temperatura y espesores en el proceso HVOF 54
2.4.6. Eficiencia de deposición en el proceso HVOF 55
2.4.7. Operaciones posteriores al proceso HVOF 56
2.5. Ensayos mecánicos 57
2.5.1. Ensayo de dureza de microindentación 57
2.5.2. Ensayo de adherencia 63
2.6. Ensayos metalográficos 70
2.6.1. Análisis metalográfico 70
2.6.2. Equipo para el análisis metalográfico 72
2.7. Medición de espesores del recubrimiento 73
2.7.1. Medición de espesores mediante el análisis metalográfico 73
2.7.2. Medición de espesores mediante un medidor portátil 73
2.7.3. Medición de espesores con un tornillo micrométrico 75
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 76
3.1. Resultados 76
3.1.1. Resultados de los ensayos mecánicos 76
3.1.2. Resultados de los ensayos metalográficos 81
3.1.3. Resultados de la medición de espesores 83
3.2. Discusión 91
3.2.1. Discusión de resultados de los ensayos mecánicos 91
3.2.2. Discusión de resultados de los ensayos metalográficos 92
3.2.3. Discusión de resultados para la medición del espesor del recubrimiento 93

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 94
4.1. Conclusiones 94
4.2. Recomendaciones 96
Referencias Bibliográficas 97
ANEXOS 100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Funcionamiento del Metalizado. 3
Figura 1.2. Estructura de un Splat. 5
Figura 1.3. Clasificación del Metalizado por su fuente de poder. 6
Figura 1.4. Esquema de una pistola para el proceso de HVOF. 10
Figura 1.5. Esquema del equipo para el proceso HVOF. 11
Figura 1.6. Carburo de tungsteno en polvo para el proceso HVOF. 14
Figura 1.7. Bomba centrífuga MCM, serie 178. 15
Figura 1.8. Esquema del eje de la bomba centrífuga Tipo W serie 178. 16
Figura 1.9. Microestructura de la Martensita. 18
Figura 1.10. Diagrama de Fase Fe-Cr-C. 19
Figura 2.1. Diagrama de la metodología experimental. 22
Figura 2.2. Codificación del Par de probetas número 1, con la pieza A y B. 24
Figura 2.3. Codificación de las placas P1 y P2. 25
Figura 2.4. Parte del eje donde se acopla al motor eléctrico. 25
Figura 2.5. Parte donde se une el eje con el rodete. 26
Figura 2.6. Cilindrado y refrentado. 26
Figura 2.7. Centro con broca de centros. 26
Figura 2.8. Agujero con broca 16 mm. 26
Figura 2.9. Rosca con machuelo M16X2. 26
Figura 2.10. Probetas para los ensayos de adherencia. 27
Figura 2.11. Parte sobrante del eje. 27
Figura 2.12. Cilindrado y refrentado en torno. 28
Figura 2.13. Planeado del material. 28
Figura 2.14. Placa con código P1. 28
Figura 2.15. Placa con código P2. 28
Figura 2.16. Limpieza de las probetas para realizar el metalizado. 32
Figura 2.17. Granos de $(Al2O3)$ con malla (a) 240 y (b) 150. Aumento 130X. 34
Figura 2.18. Granalla de óxido de aluminio de malla 16. 35
Figura 2.19. Equipo de granallado. 37
Figura 2.20. Granallado en las probetas. 38
Figura 2.21. Granallado de la placa P1. 40
Figura 2.22. Ubicación de probetas 1A, 2A, 3A y 4A. 41
Figura 2.23. Probetas 1A, 2A, 3A y 4A. 42
Figura 2.24. Placas P1 y P2. 42
Figura 2.25. Precalentamiento de las probetas. 45

Figura 2.26. Proyección Aceptable. 48
Figura 2.27. Proyección mínima aceptable. 48
Figura 2.28. Movimiento relativo pistola-sustrato. 49
Figura 2.29. Gases utilizados en el proceso. 51
Figura 2.30. Control de temperatura en el recubrimiento de las probetas. 54
Figura 2.31. Control de temperatura en las placas P1 y P2. 54
Figura 2.32. Espesor del recubrimiento en las probetas para adherencia. 55
Figura 2.33. Espesor en Placas P1 y P2. 55
Figura 2.34. Indentador Pirámide de Diamante. 58
Figura 2.35. Muestras para el ensayo de dureza de microindentación. 59
Figura 2.36. Placas metalizadas por HVOF (P1 y P2). 60
Figura 2.37. Sierra de precisión (IsoMet 1000). 60
Figura 2.38. Muestras de las placas P1 y P2. 60
Figura 2.39. Resina Phenolic Mounting Powder. 61
Figura 2.40. Prensa Hidráulica BUEHLER. 61
Figura 2.41. Pastillas con muestras de las placas P1 y P2. 61
Figura 2.42. Probeta para el ensayo de Adherencia. 64
Figura 2.43. Modelo de la probeta para el ensayo de adherencia. 64
Figura 2.44. Carga aplicada hasta llegar a la ruptura. 65
Figura 2.45. Soporte para probetas. 67
Figura 2.46. Probetas con resina para curar. 68
Figura 2.47. Probetas curadas para ensayar. 69
Figura 2.48. Dispositivo de auto-alineación con la muestra lista. 69
Figura 2.49. Muestras montadas en la resina. 71
Figura 2.50. Medición de espesor del recubrimiento. 74
Figura 2.51. Medición de espesor antes y después HVOF. 75
Figura 3.1. Codificación de las muestras para las metalografías. 76
Figura 3.2. Representación gráfica de las durezas del recubrimiento en la placa P1.. 78
Figura 3.3. Representación gráfica de las durezas del recubrimiento en la placa P2.. 78
Figura 3.4. Gráfico de barras de la resistencia de tracción en cada probeta 80
Figura 3.5. Medición de espesores con el Software ImageJ. 83
Figura 3.6. Gráfica de espesores de la muestra M1 – P1. 84
Figura 3.7. Gráfica de espesores de la muestra M2 – P1. 85
Figura 3.8. Gráfica de espesores de la muestra M1 – P2. 86
Figura 3.9. Gráfica de espesores de la muestra M2 – P2. 87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Parámetros del proceso HVOF para la pistola Wáter. 10
Tabla 1.2. Clasificación de los parámetros en el proceso HVOF. 12
Tabla 1.3. Clasificación de los aceros inoxidables según AISI. 17
Tabla 1.4. Propiedades físicas del acero inoxidable martensítico de grado 416..... 20
Tabla 1.5. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables martensíticos 416..... 20
Tabla 1.6. Composición química de los aceros inoxidables martensíticos. 21
Tabla 2.1. Tamaños de granos para el granallado en procesos de metalizado. 33
Tabla 2.2. Características Generales del ALOMIX – L (Macro). 35
Tabla 2.3. Análisis Químico por FRX (%) del ALOMIX – L (Macro)..... 36
Tabla 2.4. Densidad aparente del ALOMIX – L (Macro). 36
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del equipo de Granallado. 36
Tabla 2.6. Parámetros en el granallado para preparar el sustrato..... 37
Tabla 2.7. Perfil de anclaje para el óxido de aluminio ($Al2O3$)..... 39
Tabla 2.8. Análisis de rugosidad en el sustrato 39
Tabla 2.9. Especificaciones técnicas del medidor de perfil de superficie. 39
Tabla 2.10. Coeficientes de transferencia de calor. 44
Tabla 2.11. Parámetros a controlar previo al proceso de metalizado. 45
Tabla 2.12. Especificaciones técnicas del equipo de metalizado por HVOF. 47
Tabla 2.13. Parámetros de movimiento. 50
Tabla 2.14. Parámetros de gases empleados en la aplicación HVOF..... 52
Tabla 2.15. Parámetros del recubrimiento. 54
Tabla 2.16. Eficiencia de deposición ED. 56
Tabla 2.17. Especificaciones técnicas del Microdurómetro. 59
Tabla 2.18. Especificaciones técnicas de la pulidora manual. 62
Tabla 2.19. Especificaciones técnicas de la pulidora semiautomática. 63
Tabla 2.20. Especificaciones de la máquina universal de ensayos mecánicos. 66
Tabla 2.21. Propiedades de la resina EP15 Master Bond. 67
Tabla 2.22. Especificaciones técnicas del horno para curado de la resina. 68
Tabla 2.23. Especificaciones técnicas del microscopio óptico. 72
Tabla 2.24. Especificaciones técnicas del medidor de espesor portátil. 74
Tabla 2.25. Especificaciones técnicas del tornillo micrométrico. 75
Tabla 3.1. Resultados de la de dureza de microindentación – Placa P1 y P2. 77
Tabla 3.2. Resultados de la dureza de microindentación en el acero inoxidable 416.. 77
Tabla 3.3. Resultados de los ensayos de adherencia. 79
Tabla 3.4. Imágenes metalográficas de la zona transversal de las placas P1 y P2..... 81

Tabla 3.5. Imágenes metalográficas de la microindentación de las placas P1 y P2. ... 82
Tabla 3.6. Resultados de espesores de la muestra M1 – Placa P1. 84
Tabla 3.7. Resultados de espesores de la muestra M2 – Placa P1. 85
Tabla 3.8. Resultados de espesores de la muestra M1 – Placa P2. 86
Tabla 3.9. Resultados de espesores de la muestra M2 – Placa P2. 87
Tabla 3.10. Espesores del recubrimiento de la placa P1 y P2 (Tornillo micrométrico). 88
Tabla 3.11. Espesores del recubrimiento de la placa P1 y P2 (Medidor portátil). 88
Tabla 3.12. Espesores del recubrimiento tomadas con el tornillo micrométrico..... 89
Tabla 3.13. Espesores del recubrimiento tomadas con el medidor portátil. 89
Tabla 3.14. Comparación de los resultados de espesores de las probetas para ensayos de adherencia 90
Tabla 3.15. Comparación de los resultados de espesores para las placas P1 y P2.... 90

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. Polvo Carburo de tungsteno HVOF P88-12 101
ANEXO II. Diagrama de partes de la Bomba centrífuga Tipo W, Serie (178) 102
ANEXO III. Ficha técnica del acero inoxidable 416 105
ANEXO IV. Granalla Óxido de aluminio ALOMIX – L 107
ANEXO V. Equipo de Granallar 3.5 CF SCHMIDT 108
ANEXO VI. TeroJet AC HVOF 110
ANEXO VII. Hoja de procesos del metalizado 113
ANEXO VIII. Norma ASTM C633 – 13 115
ANEXO IX. EP15 Master Bond 122
ANEXO X. Informe Técnico – Ensayos de Microdureza (ASTM E384) 125
ANEXO XI. Informe Técnico – Ensayos de adherencia (ASTM C633) 126
ANEXO XII. Informe Técnico – Ensayos Metalográficos (ASTM E407) 129
ANEXO XIII. Medición de espesores de las placas P1 y P2 132
ANEXO XIV. Medición de espesores en probetas para ensayos de adherencia 133

GLOSARIO DE TÉRMINOS

HVOF	High Velocity Oxy-Fuel
AISI 416	Acero inoxidable martensítico de grado 416
AISI 316L	Acero inoxidable austenítico con carbón extra
MCM	Centrifugal pumps
ASTM C633	Método de prueba estándar para adhesión o fuerza de cohesión de recubrimiento de pulverización térmica
ASTM E384	Método de prueba estándar para la dureza de microindentación de materiales
ASTM E92	Método de prueba estándar para la dureza Vickers de materiales metálicos
ASTM E407	Practica estándar para metales y aleaciones de micrograbado
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
HB	Dureza Brinell
DPH	Dureza de pirámide de diamante
SPLAT	Es una gota liquida proyectada contra el sustrato
WC	Carburo de tungsteno o carburo de wolframio
WC - Co	Carburo de tungsteno con cobalto
WC - 12Co	Carburo de tungsteno con 12% de cobalto
WC - CoCr	Carburo de tungsteno con cobalto y cromo
Al_2O_3	Óxido de aluminio
1A	Par de probeta número uno, pieza A
1B	Par de probeta número uno, pieza B
P1	Placa 1 para metalizar
P2	Placa 2 para metalizar
IMETCA	Empresa Ingeniería de metalización
SSPC	Steel Structures Painting Council, Pittsburgh USA
ALOMIX - L	Granalla compuesta a base de óxido de aluminio
EP15	Resina para el ensayo de adherencia de marca Master Bond
CF	Pies cúbicos
SCFH	Standard cubic feet of gas per hour
SLM	Standard liter per minute
ED	Eficiencia de deposición

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación, se estudió y se caracterizó el proceso de metalizado para los ejes de las bombas centrífugas utilizadas en el sector petrolero de la amazonía ecuatoriana.

Para poder caracterizar el método HVOF en el eje de acero inoxidable martensítico 416, se midió las propiedades mecánicas de la capa metalizada de carburo de tungsteno, mediante los ensayos de dureza de microindentación (ASTM E384) y los ensayos de adherencia (ASTM C633), además se realizó ensayos metalográficos (ASTM E407). Estos ensayos se aplicaron en 5 pares de probetas cilíndricas y 2 placas que se elaboraron a partir del eje de acero inoxidable 416 de la bomba centrífuga. El proceso se llevó a cabo con las pruebas experimentales en las probetas y placas elaboradas, aplicando el proceso de HVOF en las instalaciones de la empresa IMETCA.

A parte de los resultados obtenidos, se midió los espesores de las probetas y de las placas metalizadas por HVOF, sacando un promedio del espesor del recubrimiento a base de carburo de tungsteno.

Palabras clave: Acero inoxidable 416, Bombas centrífugas, HVOF, Metalización, Roció Térmico.

ABSTRACT

In the present research project, the metallizing process was studied and characterized for the axes of the centrifugal pumps used in the oil sector of the Ecuadorian Amazon.

In order to characterize the HVOF method in the martensitic stainless steel 416 shaft, the mechanical properties of the tungsten carbide metallized layer were measured by the microindentation hardness tests (ASTM E384) and the adhesion tests (ASTM C633), Metallographic tests were also carried out (ASTM E407). These tests were applied in 5 pairs of cylindrical test pieces and 2 plates that were made from the 416 stainless steel shaft of the centrifugal pump. The process was carried out with the experimental tests in the test tubes and plates prepared, applying the HVOF process in the facilities of the company IMETCA.

In addition to the results obtained, the thicknesses of the specimens and the plates metallized by HVOF were measured, taking an average thickness of the coating based on tungsten carbide.

Keywords: Centrifugal pumps, HVOF, Metallization, Stainless steel 416, Thermal Spray

“ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE METALIZACIÓN POR HVOF DE UN EJE DE ACERO INOXIDABLE DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA”

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera, las bombas centrífugas tienen una aplicación fundamental para el bombeo de fluidos en todas las etapas del proceso de separación de los componentes del crudo de petróleo. En estas actividades una parte crítica es en la utilización del bombeo de lodos, lo cual produce un desgaste agresivo del eje de la bomba, el cual se da por abrasión, cavitación, desalineamiento, etc. En cada etapa de trasteo de los taladros (traslado a otro pozo) se realizan tareas de mantenimiento, inspección en bombas, generadores y otros equipos. Los ejes de las bombas requieren un procedimiento de mantenimiento por soldadura que recupere apropiadamente las propiedades mecánicas y dimensionales del eje para prolongar la vida útil del equipo y a un costo competitivo.

Uno de los objetivos del presente proyecto de investigación es plantear un proceso de metalización mediante el uso de llamas oxi-gas con aporte de metales duros de alta velocidad HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) como una real opción para solucionar el problema expuesto.

En el proyecto de investigación se buscará la caracterización del proceso HVOF para ejes de aceros inoxidables martensiticos AISI 416 con aplicación en las bombas centrífugas. Mediante de la metodología de la investigación del proceso HVOF se entregará un estudio ordenado y fiable para el desarrollo repetitivo del proceso anteriormente dicho. La metodología se caracterizó por ser clara en aspectos específicos del proceso para facilitar el desarrollo del mismo.

Para la evaluación de las propiedades del recubrimiento que entrega el metalizado por HVOF y garantizar el desempeño del proceso, se realizará la metodología experimental, sometiéndoles a los respectivos ensayos que sean necesario para validar el proyecto de investigación.

Además, se analizarán las propiedades mecánicas del recubrimiento, los ensayos a realizarse en el proyecto de investigación son los de adhesión y cohesión bajo la norma ASTM C633, los ensayos de microdureza con el procedimiento de la norma ASTM E92, ensayos de metalografía con el procedimiento de la norma ASTM E384 y la medición de

espesores de los recubrimientos. Se desarrollará un análisis de las muestras o mediciones tomadas durante los ensayos de cada una de las probetas, para así poder garantizar el proceso en la industria, por medio de las herramientas que brinda el control estadístico de procesos.

Pregunta de Investigación

¿La investigación se plantea si el proceso de metalización por HVOF aplicado en ejes de bombas centrífugas para el empleo en el campo petrolero en el sector del Oriente Ecuatoriano va aumentar la dureza del mismo?

Objetivo general

- Estudiar y caracterizar el proceso de metalización por HVOF de un eje de acero inoxidable de una bomba centrífuga.

Objetivos específicos

- Aplicar el método HVOF para elaborar las probetas metalizadas.
- Medir las propiedades mecánicas de la capa metalizada.
- Realizar ensayos macro y micrográficos para la estructura metalizada de acuerdo a la caracterización del proceso de metalización por HVOF.
- Analizar la metodología de aplicación del recubrimiento mediante el proceso de metalización por HVOF.

Alcance

- Se caracterizará el proceso HVOF para los ejes de acero inoxidables martensíticos AISI 416.
- Se realizará ensayos de adherencia bajo la Norma ASTM C633, ensayos de microdureza bajo la Norma ASTM E92, ensayos metalográficos bajo la Norma ASTM E407.
- Se elaborará 5 pares de probetas para los ensayos de adherencia, 2 placas como probetas para los ensayos de dureza de microindentación y el análisis metalográfico.
- Se medirá un promedio de espesores del recubrimiento de las probetas provistas para los ensayos de adherencia, para los ensayos de microindentación y análisis metalográfico.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Introducción

En esta parte del proyecto de investigación se describe el proceso de metalizado con la finalidad de dar un recubrimiento, en un eje de una bomba centrífuga usada en el sector petrolero.

Estos elementos demandan un constante uso y por ende su desgaste continúo o sustitución del elemento. Se describirá todo lo que involucra al proceso para dar un recubrimiento deseado, indicando también las causas por el que se originan el degaste en el eje de la bomba centrífuga.

Para la elaboración de las pruebas de dureza, adherencia y metalográficas, se describirá un método estadístico para la toma de datos, los cuales permitan y garanticen resultados fiables.

1.2. Proceso de metalizado

1.2.1. Definición de metalizado

El metalizado es un proceso térmico, el cual brinda capas de recubrimiento superficial de mejores características al del material base sobre un substrato, siendo un proceso que se lleva a cabo por dispositivos especiales que aportan gran energía para permitir que el recubrimiento se adhiera a la superficie del elemento a metalizar. Se puede observar el principio de funcionamiento del metalizado en la Figura 1.1.

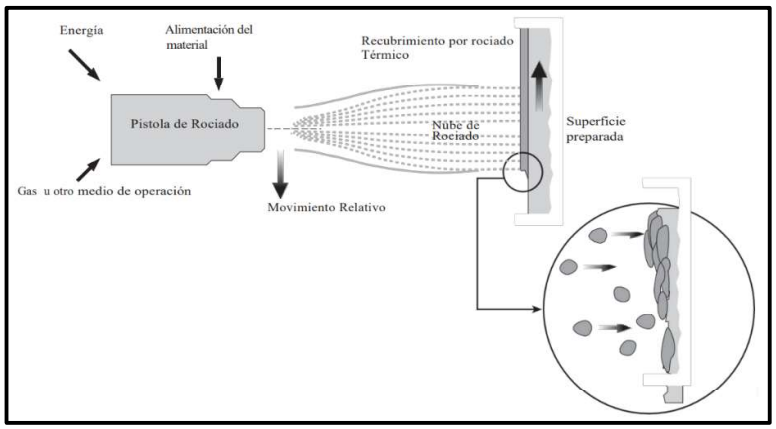


Figura 1.1. Funcionamiento del Metalizado.

(Fuente: (MSC Corp, 2015).)

Algunos autores lo conoce al proceso como: Termorociado, Rociado Térmico o Thermal Spray. El proceso se basa en partículas fundidas de material metálico o de aleación, proyectadas a gran velocidad sobre la superficie del elemento a metalizar.

1.2.2. Generalidades del proceso de metalizado

El proceso de metalización es el resultado de calentar el material de aporte, este puede ser en polvo o en alambre, hasta llegar al estado fundido o semifundido. El movimiento relativo del material de aporte resulta de las corrientes de gases o aire comprimido para su proyección hacia una superficie preparada llamada substrato.

En el metalizado se tiene dos etapas bien definidas, una es la atomización y la otra la aportación. En la etapa de la atomización se da a lugar la fragmentación del polvo, que se encuentra en estado líquido, adquiriendo formas de "gotitas".

Mientras en la etapa de la aportación se dan dos momentos, en el primer momento de la deposición las gotas se transportan e interactúan con los gases empleados. Para el segundo momento las gotas se proyectan sobre el substrato.

1.2.3. Sustrato

El sustrato es la superficie preparada para la aplicación del recubrimiento por medio de la metalización. Los materiales de los sustratos adecuados son capaces de resistir procedimientos para su preparación y permiten endurecerla, con promedio de dureza de 55 HRC. Hay técnicas capaces de aumentar la dureza del sustrato.

Bajo el requerimiento de adherencia que presenta el recubrimiento, el sustrato debe presentar ciertas características:

- **Limpieza cuidadosa:** Eliminar impurezas que se encuentren en la superficie por métodos mecánicos o el empleo de sustancias químicas.
- **Rugosidad superficial:** Se puede obtener por medio de granallado, considerar factores como el tipo de grano, tamaño, ángulo de impacto de la granalla, etc.
- **Precalentamiento del sustrato:** La temperatura superficial del sustrato es muy importante, ya que va a liberar tensiones residuales presentadas por el choque térmico entre líquido fundido del recubrimiento.

En si unos de los pasos para tener un proceso adecuado de metalización, sería tener la preparación adecuada del sustrato previo a metalizar, esto permite que la adherencia, entre el recubrimiento y el sustrato se de en las condiciones idóneas, con el fin de obtener las características y propiedades buscadas en el material base.

1.2.4. Splat

Al desarrollarse el proceso de metalizado, en el instante de la proyección de partículas en el sustrato, ocurre una formación de gotitas líquidas. Se usa el término "SPLAT" para describir la formación de una gotita única o partícula proyectada contra el sustrato como se indica en la Figura 1.2. La formación de los splats da como resultado un bloque estructural en el proceso, y la formación se da a partir de partículas aceleradas y fundidas impactando en el sustrato.

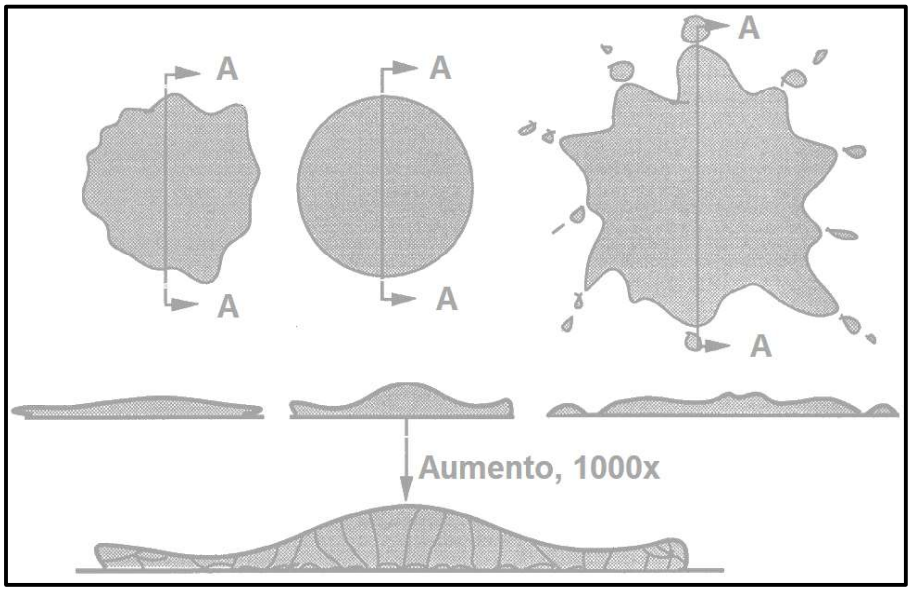


Figura 1.2. Estructura de un Splat.
(Fuente: (Handbook, 2004).)

Las splats son generalmente esféricas y al impactar con el sustrato se extienden y llenan los intersticios subyacentes, convirtiéndose en estructuras planas y al pulirse en sección transversal se puede observar la estructura laminar. (Handbook, 2004).

Un factor muy importante es tener un splat circular, para facilidad de unión entre ellas y así formar una capa uniforme. Como resultado el splat es el principal elemento a considerar en el proceso de metalizado.

1.2.5. Clasificación de los procesos y técnicas de metalizado

Según la fuente de poder que se utiliza en las distintas técnicas del metalizado, la clasificación se da de la siguiente manera, como se indica en la Figura 1.3., también se puede observar los principales procesos del metalizado: Arco de plasma, arco eléctrico, llama y el Cinético (Metalizado en frio).

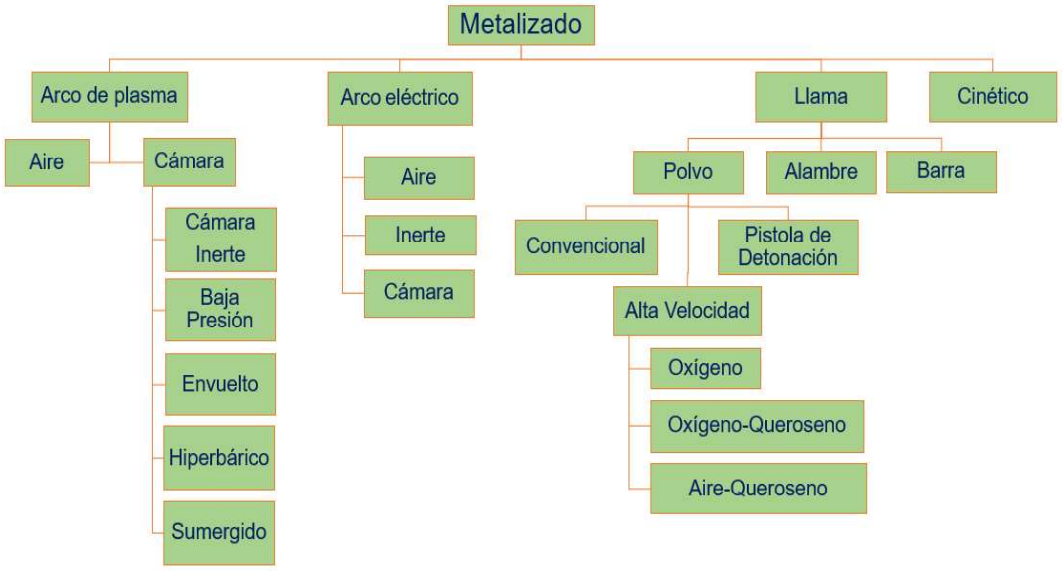


Figura 1.3. Clasificación del Metalizado por su fuente de poder.

(Fuente: (Handbook, 2004).)

1.2.6. Proceso de metalizado con llama

El proceso de metalizado con flama es el primero en desarrollarse en el año 1910 y hoy en día es de uso común y las antorchas han cambiado desde la década de 1950. En este proceso como fuente de energía se utiliza la combustión química de los gases para generar el calor necesario para fundir.

Se tiene que el proceso por flama encierra subcategorías y así cada una de ellas brinda sus propios atributos. A través de cada una de las subcategorías, es posible proyectar una variedad extensa de materiales desde cerámicos hasta polímeros. Las subcategorías se clasifican de acuerdo por el material de recubrimiento y se describen de la siguiente manera:

- Metalizado por llama con polvo.
- Metalizado por llama con alambre.

- Metalizado por llama con barra sólida.

Dentro de la clasificación del metalizado, el tema de interés para el estudio del proyecto de investigación será el proceso de metalizado por llama con la utilización de polvos como recubrimientos, la técnica empleada será la de alta velocidad por oxícombustible (High Velocity Oxy-fuel) o por sus siglas (HVOF).

1.2.7. Aplicaciones para el proceso de metalización

Con el desarrollo de la tecnología se tiene una infinidad de elementos mecánicos que requieren de propiedades especiales para su funcionamiento, debido al uso constante se presentan desgastes propios del trabajo de dicho elemento.

El proceso de metalización puede brindar recubrimientos que disminuyan considerablemente los esfuerzos que se dan al desgaste, ataque químico, altas temperatura y entre otros más como los señala y los describe el autor (González López, 2010) a continuación:

Industria civil

- Mediante la protección catódica, una aplicación del proceso se puede dar en el depósito de Zn en estructuras de acero en hormigón armado en puentes y entre otras estructuras.
- El uso de aluminio en estructuras portátiles, mediante la aplicación del metalizado con polvos compuestos de $\mathrm{Al/Zn}$ o $\mathrm{Al/Zn/Sn/In}$.

Industria aeronáutica y energética

- En sistemas hidráulicos para el tren de aterrizaje, protegiéndolos ante la corrosión y erosión utilizando recubrimientos de $\mathrm{WC-CoCr}$, $\mathrm{Cr_3C_2-NiCr}$, Acero inoxidable, Inconel y Hastelloy.
- El uso de barreras térmicas en las turbinas, con $\mathrm{NiCr-ZrO_2}$, mejorando el rendimiento soportando temperaturas de 100 °C. Empleando menos refrigerante.

Industria papelera

- Para los rodillos empleados en las fábricas de papel, que tienden a corroerse, se le puede hacer un metalizado con AISI 316L, AISI 420 como material de recubrimiento.
- Para el desgaste en los rodillos se puede aplicar recubrimientos WC-Co.

Industria petrolera o petroquímica

- Hay un sin número de elementos que se pueden aplicar recubrimientos para la protección contra la corrosión. Por ejemplo para válvulas y bombas, se le puede aplicar recubrimientos tales como el INCONEL-625, y con el proceso HVOF se le puede aplicar el $WC - CoCr$ como recubrimiento.
- Para los desgaste a elevadas temperaturas de anillos, retenedores, se le aplica recubrimientos con base de Co.
- Por el desgaste de erosión y abrasión en bombas y turbinas debido a existencia de partículas extrañas en el fluido, para darle dureza a los elementos se emplea recubrimientos de $WC - Co$, $WC - CoCr$, $Cr_3C_2 - NiCr$, Cr_2O_3, Stellite y $NiCrBSi$.

Industria naval

- En esta industria los problemas de corrosión por picaduras en el timón de dirección, la respuesta es aplicar metalizado por HVOF con recubrimientos de $WC - CoCr$. Un claro de ejemplo es el USS-SAIPAN que se le aplicó el proceso HVOF en el timón de dirección y tuvo 2 años y medio sin reparaciones.
- Aplicación de capas térmicas en pistones y válvulas, mejorando el rendimiento por el enfriamiento de gases.

Industria automovilística

- Barreras térmicas en los colectores de motores turboalimentados, evitando el bajo rendimiento por enfriamiento de gases en el mismo.
- Recubrimientos de antifricción Mo, $AISI\text{-}Mo$ en partes de motores, en el interior del cilindro, en anillos de sincronización.

1.3. Proceso de metalizado por HVOF

El proceso metalizado de alta velocidad con oxícombustible (HVOF) es una técnica reciente de la familia de los procesos de metalizado por flama.

1.3.1. Reseña histórica

El metalizado se originó en el año 1958, fue inventado por Union Carbide Corporation lo que actualmente es Praxair Surface Technologies, Inc. sin tener importancia en el mercado hasta la década de 1980, cuando el sistema Jetkote fue presentado por James Browning, el proceso HVOF empezó a ser de interés comercial de algunas empresas. (Handbook, 2004)

El funcionamiento del proceso HVOF es similar al del proceso con pistola de detonación, en la quema del combustible es continua y repetitiva respectivamente para los procesos mencionados. Hay muchos autores como Bick y Jurgens (1983) y Kreye (1986), entre más autores que concuerdan que el trabajo inicial se dio inició en la Escuela de Ingeniería Thayer (Hanover, USA). (Pawlowski L. , 2008).

Debido al crecimiento tecnológico y esfuerzos de la mayoría de distribuidores de recubrimientos, han obtenido alta calidad de recubrimientos en el proceso de metalizado con pistola de detonación. El autor (Pawlowski L. , 2008) señala que esta técnica está siendo reemplazada por carburos y aleaciones proyectadas por el proceso HVOF.

1.3.2. Principios

El gas o líquido combustible en el proceso HVOF es introducido en altas cantidades conjuntamente con el oxígeno en la cámara de combustión, dando inicio a una alta compresión y temperatura de combustión de los gases, y el gas de escape se mueve a través de una cámara cilíndrica y se libera del dispositivo. Como se indica de forma más clara en la Figura 1.4., la que contiene las características técnicas de la pistola utilizada en el proceso HVOF.

Los grandes volúmenes de gas que se utiliza en el proceso y las altas temperaturas del producto de la combustión generan flujos de velocidades en los rangos de 1525 m/s a 1825 m/s en la salida de la boquilla. (Handbook, 2004).

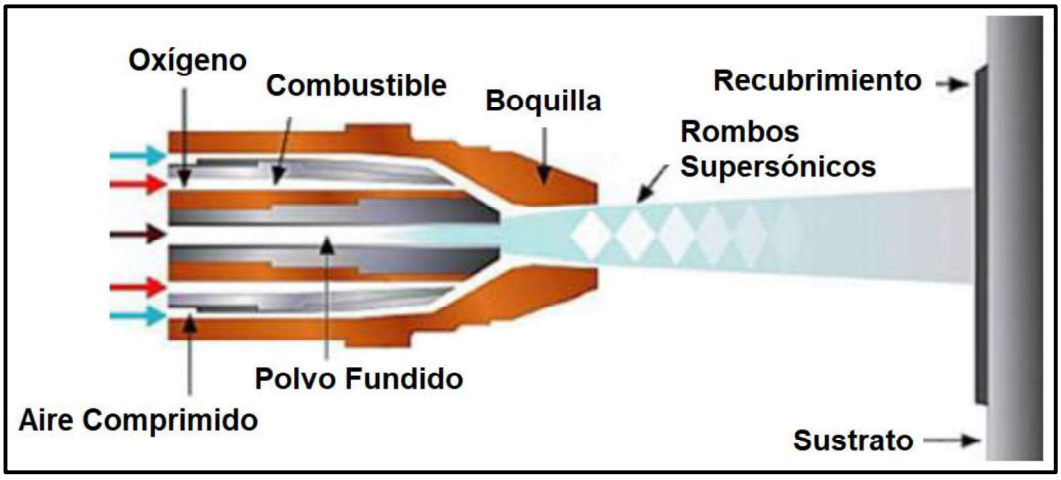


Figura 1.4. Esquema de una pistola para el proceso de HVOF.

(Fuente: (Oña Pazmiño, 2015).)

El material para el recubrimiento del proceso se encuentra en polvo, el cual es depositado radial o axialmente en la boquilla, donde las partículas se introducen en la llama para después ser proyectadas sobre el sustrato. Para el control de temperatura elevado de la cámara de combustión como los demás elementos de la pistola se tienen un sistema de enfriamiento con agua. (Pawlowski L. , 2008).

Como ejemplo de un equipo de HVOF tenemos en la Tabla 1.1., los parámetros de la pistola Wáter – Cooled DiamondJet Gun. (SULZER, 2015).

Tabla 1.1. Parámetros del proceso HVOF para la pistola Wáter.

Tecnología HVOF	
Pistola	Water - Cooled DiamondJet Gun
Características Generales	
Opciones de combustible	$H_2, CH_4, C_2H_4, C_3H_6, C_3H_8$
Presión de combustión	~ 0.55 MPa (80 PSI)
Velocidad del gas	$1800 - 2100$ m/s ($5900 - 6900$ ft/s)
Velocidad de partícula	$450 - 600$ m/s ($1475 - 1975$ ft/s)
Inyección de polvo	Alimentación axial
Presión de inyección de polvo	Mayor
Tasa de pulverización	hasta 120 g/min (16 lb/h)
Consumo por hora de operación	
Combustible	43800 litros (1670 pie^3) H_2 5280 litros (200 pie^3) C_3H_6 5280 litros (200 pie^3) C_3H_8
Oxígeno	18420 litros (700 pie^3)
Agua	600 litros (160 galones)

(Fuente: (SULZER, 2015)).

1.3.3. Equipos y elementos para el proceso HVOF

La garantía en entregar un correcto proceso HVOF está en el uso del equipo adecuado y control de los parámetros. En el proceso por definición se usa oxígeno, combustible más aire comprimido. En si el principio de funcionamiento se basa en el equipo principal que trabaja mediante combustión interna, empleando un sistema de enfriamiento con agua circulante por la pistola. El equipo del proceso HVOF seria en si la pistola, acompañado de algunos elementos para su funcionamiento.

La pistola viene a ser el cuerpo que sostiene la flama y contiene la cámara de combustión, el inyector de polvos y la boquilla. Los elementos más importantes como lo describe el autor (Handbook, 2004) van ligados al funcionamiento de la pistola y hacen que el proceso HVOF funcione correctamente son:

- Sistema de enfriamiento con agua o aire,
- Tolva para el almacenamiento de polvos de elevada presión,
- Circuitos de gas portador de oxígeno, gas combustible, aire comprimido y polvo,
- Mangueras de alta presión para gases,
- Consola de purgado y mecanismos de seguridad para el alto flujo de gas.

En la figura 1.5., se observa una pistola, donde en su cámara de combustión se da a lugar a la reacción química entre el oxígeno, gas combustible y el aire comprimido, esto se inicia por una chispa (ignición). El resultado de la mezcla es volátil y permite una combustión de alta velocidad para la proyección de partículas. (Oña Pazmiño, 2015).

Figura 1.5. Esquema del equipo para el proceso HVOF.

(Fuente: (OERLIKON METCO, 2000).)

1.3.4. Parámetros principales del proceso HVOF

Los defectos que se dan en el recubrimiento por falta de adherencia, como la atomización irregular del polvo fundido, la efectividad y rendimiento en su aplicación, son aspectos que van a depender de los parámetros de movimiento, parámetros del control de los gases y parámetros para el material de recubrimiento en el proceso de metalizado HVOF. En la Tabla 1.2., se hace una clasificación de los parámetros para la facilitar el proceso en el desarrollo de la metodología de la investigación.

Tabla 1.2. Clasificación de los parámetros en el proceso HVOF.

Parámetros de Movimiento	Patrón de metalizado Distancia entre pistola-sustrato Movimiento relativo pistola-sustrato
Parámetros en el empleo de gases	Tipos de gases Presión de gases Flujo y caudal de gases
Parámetros para el material de recubrimiento	Velocidad de alimentación Estimación del consumo del recubrimiento

(Fuente: (Morán García & Ramírez Pérez, 2010).)

Cada uno de los puntos que contiene cada parámetro señalado en la Tabla 1.2., se describen en la metodología actual del proceso HVOF en el proyecto de investigación especificando a detalle su función y efecto en el proceso.

1.3.5. Recubrimientos para el proceso HVOF

En esta sección se propone exponer lo más claro posible la selección del recubrimiento para el proceso HVOF, de esta forma el sustrato y el recubrimiento tendrán una combinación que dará como resultado un rendimiento tribológico (Relación entre desgaste, lubricación y fricción) que por separados no presentan.

En principio el material que no se descomponga cuando se funda, es factible para utilizarse como recubrimiento por proyección térmica, de acuerdo al tipo de proceso se va a utilizar el recubrimiento en polvo o en alambre.

1.3.5.1. Generalidades del recubrimiento para el proceso HVOF

Los recubrimientos para el proceso HVOF, son los polvos a base de carburos y otras opciones, también puede ser los que son a base de óxido. Las resistencias de enlace del revestimiento está limitado a ~ 83 MPa (~ 12 Ksi) según la norma ASTM C 633 y la porosidad a menos del 1%. (Handbook, 2004, pág. 58).

En cuanto a los espesores van entre los (50 – 500 µm), y respecto a la porosidad se tiene un porcentaje de (2 – 15%) dependiendo de la técnica que se use y presentan una alta rugosidad superficial (Ra ≈ 3 – 15 µm). Como resultado de la aplicación de los recubrimientos, presenta algunas cualidades como una alta resistencia al desgaste y la corrosión, obtención de recubrimientos aislantes, entrega una estabilidad dimensional, choque térmico y/o altas temperaturas. (Gómez Angarita, 2009, pág. 41).

1.3.5.2. Selección del recubrimiento para el proceso HVOF

La consideración a tomar es que el fabricante entregue una composición química que no se degraden por el proceso HVOF. La sublimación del recubrimiento no se desea que pase, de igual manera la reacción del mismo con gases de combustión, para la mayoría de casos, esto resulta inevitable en determinado nivel.

La alimentación del polvo debe ser controlada, es un parámetro fundamental para evitar los efectos de degradación en el recubrimiento y entregar una calidad requerida por el usuario. (Handbook, 2004).

El tamaño de grano, la distribución, morfología y otras características apropiadas debe tener el recubrimiento a utilizarse en el proceso, se desea una morfología de polvos esféricos en lugar de una irregular para garantizar adecuados splats, como para evitar esfuerzos residuales innecesarios en el recubrimiento. (Colmenares A, 2004, pág. 14).

- **Carburo de tungsteno WC – 12Co**

La fabricación del polvo va a influenciar mucho en el proceso de metalizado por HVOF. El WC / Co se pueden romper debido a alto grado de energía cinética y naturaleza del polvo, pero los recubrimientos de WC / Co por su porosidad inherente, tales son los recubrimientos densificados en plasma, sinterizados y triturados o secados por pulverización (ver la Figura 1.6.), estos recubrimientos van a funcionar muy bien en las

pistolas de HVOF. Las partículas no se rompen al impactar, porque la energía se desgasta a medida que el polvo colapsa al adherirse al sustrato. (Handbook, 2004).

Figura 1.6. Carburo de tungsteno en polvo para el proceso HVOF.
(Fuente: https://4.imimg.com/data4/RB/OC/ANDROID-4604014/product-500x500.jpeg)

El recubrimiento para emplear en el proceso HVOF en el eje de acero inoxidable de la bomba centrífuga, es el carburo de tungsteno con 12% de cobalto (WC – 12Co) especialmente diseñado para el proceso HVOF, que produce unos recubrimientos duros, resistentes a la abrasión y corrosión. Con una amplia variedad de aplicaciones utilizados en la industria hidroeléctrica (alabes y ruedas), elementos mecánicos en la industria petrolera y en otras industrias donde la erosión, abrasión y fricción son de mayor importancia. Su composición química esta con el 88% WC y el 12% Co, una dureza de 73 HRC y un esfuerzo de adherencia mayor a 10000 psi, datos del recubrimiento WC-12Co en el Anexo I. (MESSER Group, 1998).

1.4. Bomba centrífuga

El autor (Arias Caceres, 2008) define la bomba centrífuga así, "Lo mismo que en cualquier otra bomba, sirve para producir una ganancia en carga estática en un fluido, imprime pues, una energía a un fluido procedente de una energía mecánica que se ha puesto en su eje por medio de un motor".

Estas bombas son vendidas por algunas empresas como: National Oilwell, Mission, Halco, Harrisburg, Continetal Emsco y Demco, con piezas intercambiables, empresas que no se encuentra en el país, lo cual en la parte de adquisición de los elementos seria de importar y conlleva a más costos en la parte del mantenimiento.

1.4.1. Bomba centrífuga Tipo W, serie 178

Las bombas centrífugas tipo W de serie 178, entregan una amplia garantía en bombeo para el manejo de lodos abrasivos. Este tipo de bombas está diseñada para un campo amplio de fluidos, desde cantidades pequeñas hasta miles de galones. El modelo de la bomba la podemos ver en la Figura 1.7. El diagrama de partes de la bomba centrífuga Tipo W de serie 178 de marca MCM, se detalla en el Anexo II.

Figura 1.7. Bomba centrífuga MCM, serie 178.
(Fuente: MCM CENTRIFUGAL PUMPS, 1943)

El eje de la bomba tiene un diámetro de $1\frac{7}{8}$ [in], y las demás piezas son elementos intercambiables debido al desgaste y terminación de su vida útil, y otros motivos que salen del diseño de los fabricantes. Los elementos más importantes que tiene la bomba son: el impulsor, camisa del eje, eje, sello mecánico, cojinetes, entre otros más.

1.4.2. Especificación del eje de la bomba centrífuga

Dado las condiciones de trabajo del eje, condiciones de corrosión, degaste abrasivo, entre otros, el diseño para la bomba centrífuga tipo W de serie 178 de marca MCM contempla un eje con acero inoxidable 416, especificado en el diagrama de partes como elemento número 7 del ensamble del Anexo II. El eje está diseñado para transmitir torque máximo con la mínima deflexión del mismo. Un diseño de eje con un diámetro de $1\frac{7}{8}$ [in], permite transmitir la palanca que requiere para una demanda máxima en las aplicaciones y condiciones más severas de trabajo, su esquema se puede observar en la Figura 1.8.

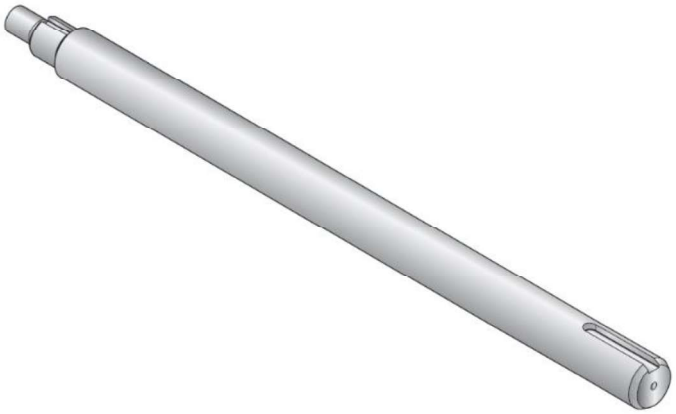


Figura 1.8. Esquema del eje de la bomba centrífuga Tipo W serie 178.
(Fuente: Propia)

1.4.3. Desgastes que se producen en el eje de la bomba centrífuga

De acuerdo con el estudio tribológico hay una íntima relación entre la pieza y el recubrimiento, debido a tres fenómenos como: la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural y la lubricación como medio para evitar desgaste, el desgaste como efecto natural del eje de la bomba centrífuga lo podemos controlar por medio del proceso de metalizado, mejorando las propiedades mecánicas de las que ya posee el eje de acero inoxidable 416. (Holmberg & Matthews, 2009).

Antes de seleccionar el recubrimiento que se utilizará en el proceso, se debe especificar las causas de desgaste que se presenta en el material, así estructurar el comportamiento del recubrimiento, el cual debe tener un promedio de características y propiedades descritas.

Los siguientes tipos de desgastes como son: desgaste abrasivo, desgaste por picadura y fatiga superficial o picado, se producen como tendencia a sufrir en el eje por diferentes condiciones de uso y ambiente como lo detalla el autor (Espejo Mora & Martinez, 2011).

Desde la perspectiva de señalar todos los desgastes que se pueda dar u ocurrir en el eje, se puede simplificar y realizar una lista de las propiedades que deberá cumplir por el recubrimiento, como ya mencionamos hay una estrecha relación, entonces las necesidades que tiene el material las debe implementar el recubrimiento.

Entre todos los desgastes presentados anteriormente en el material, las que requieren mayor interés y de la mano con el recubrimiento a implementar son las de dar altas durezas en la superficie, altas temperaturas de trabajo y resistencia a la corrosión.

1.5. Aceros inoxidables

1.5.1. Descripción de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables resultan de la composición de dos o más elementos, estructurando así una aleación de acero con características especiales, dándole un plus sobre los demás aceros, con excepcional resistencia a la corrosión. (Toapanta Chiluisa, 2017).

Los aceros inoxidables tienen características que pueden soportar casi cualquier tipo de ambiente severo a la corrosión, la propiedad de inoxidable la atribuye el cromo con porcentajes desde los 10.5% hasta los 30%, en algunos casos se puede adicionar níquel y manganeso. La clasificación de los aceros inoxidables se da por 5 clases, establecido por el instituto Americano del Acero (American Iron a Steel Institue, AISI), se detalla en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Clasificación de los aceros inoxidables según AISI.

Clase	Clasificación AISI	Ejemplos de especificaciones
I Martensiticos	SERIE 400	410, 416, 420, 431
II Ferríticos		409, 430, 434
III Austeníticos	SERIE 200 y 300	304, 304L, 321, 316
IV Dúplex	Se usa el nombre comercial	329, 2205
V Endurecibles por precipitación		17-4 PH, 15-5 PH 17-7 PH, 15-7 MO

(Fuente: (CENDI, 2002).)

1.5.2. Aceros Inoxidables Martensíticos

La estructura atómica de la martensítica tiene un arreglo atómico tetragonal centrado en el cuerpo (BCT), la metalurgia que corresponde a los aceros inoxidables consiste en aleaciones de hierro y cromo con un contenido de carbono que puede variar hasta el 1%, brindando un aumento en la resistencia mecánica y dureza producido por el tratamiento térmico que entrega las propiedades de la martensítica, formando parte de la primera

clasificación de los aceros inoxidables, fueron los primeros en desarrollarse en el mercado industrial con serie AISI 400. (CENDI, 2002).

- **Propiedades de la Martensita**

Según el autor (INDURA, 2010) la martensita describe las siguientes propiedades:

- Dureza de 50 – 68 RC (495 – 745 HB)
- Resistencia a la tracción de 170 – 250 kg/mm²
- Alargamiento del 0.5 – 2.5%
- Forma acicular
- Resistencia a la corrosión
- Son magnéticos
- Baja soldabilidad
- Endurecibles por tratamiento térmico, para resistencias mecánicas y durezas altas

El autor (INDURA, 2010) describe que los aceros templados suelen quedar demasiado duros y frágiles, inconveniente que se corrige por medio del revenido que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica inferior (723°C), dependiendo de la dureza que se desee obtener, enfriándolo luego al aire. Se puede observar la microestructura de la martensita en la Figura 1.9.

Figura 1.9. Microestructura de la Martensita.

(Fuente: (INDURA, 2010).)

1.5.3. Diagrama Hierro-Cromo-Carbono

El objetivo de agregar carbono es para modificar la forma de la curva gamma, a medida que el carbono aumenta la curva se traslada hacia la derecha. En la figura 1.10., se muestra el diagrama de fase hierro-cromo con 0.1 % de carbono con cantidad fija.

Los autores (Cevallos Guerrero & Cisneros Martínez, 2013) indican que para la aleación de 11.5 % cromo con el 0.1% de carbono, es recomendado aplicarle una temperatura de 1000°C para proceder a templar, el rápido enfriamiento da la facilidad que la austenita se convierta en martensita.

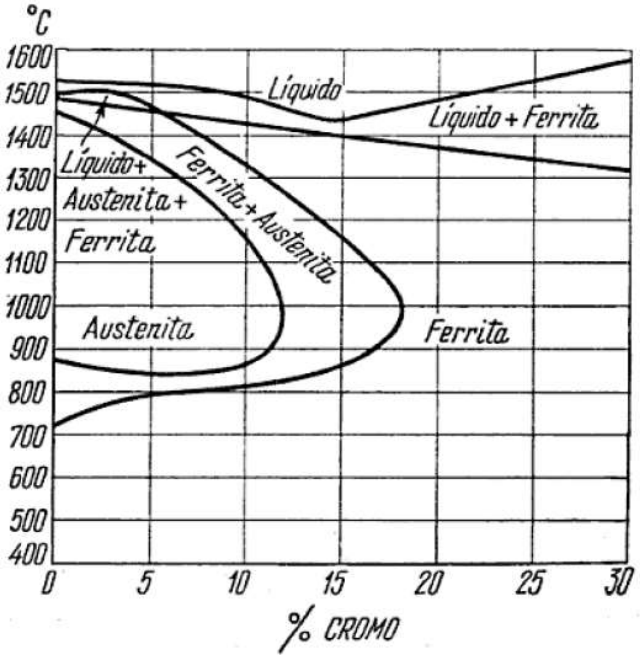


Figura 1.10. Diagrama de Fase Fe-Cr-C.

(Fuente: (Istrati, 1961).)

1.5.4. Acero Inoxidable Martensítico 416

Para el desarrollo del proyecto de investigación se optó por aplicar el proceso HVOF en el eje de la bomba centrífuga, el material de este elemento es AISI 416. Así se puede empezar definiendo a este material dentro de los aceros inoxidables, ubicado en el grupo de la serie 400 - 500, este acero inoxidable de tipo 416 es una versión particular del tipo 410, el cual brinda las más altas características de maquinabilidad de la familia martensítica.

1.5.4.1. Características del acero inoxidable 416

La diferencia del tipo 410 con el 416, es que el 416 tiene adición de fósforo y azufre, lo cual lo hace un acero fácil de mecanizar, así evitando disminuir la resistencia a la corrosión, significa que en zonas de ambientes suaves como agua, materiales orgánicos y productos de petróleo, va trabajar muy bien. Un aspecto importante es el alto contenido de azufre, hace que el material sea frágil en caliente y que sea difícil la soldadura en este material. Las propiedades físicas, mecánicas, químicas y la descripción general del acero están en el Anexo III, cuyo resumen se indica en las Tabla 1.4. , Tabla 1.5. y Tabla 1.6., siguientes.

- **Propiedades Físicas**

Las propiedades físicas del acero inoxidable 416, se detallará en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Propiedades físicas del acero inoxidable martensítico de grado 416.

Propiedad Física	Valor
Densidad	7700 Kg/m³
Módulo de elasticidad	200 Gpa
Resistividad eléctrica	570 nΩ.m
Calor especifico	0 – 100 °C (J/Kg.K)
Coeficiente medio de expansión térmica	0 – 100°C (9.9 µm/m/°C)
Conductividad térmica	A 100°C (24.9 W/m.K)

(Fuente: (Atlas Steels Technical Departament, 2013, pág. 49).)

- **Propiedades Mecánicas**

Las propiedades mecánicas a temperatura ambiente se tienen en la siguiente tabla 1.5.

Tabla 1.5. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables martensíticos 416.

Temperatura de templado (°C)	**Resistencia a la tracción (Mpa)**	**Prueba de fuerza de rendimiento 0.2 % (Mpa)**	**Elongacion (% in 50mm)**	**Dureza (HB)**	**Impacto Izod (J)**
Recocido	517	276	30	262 max*	-
300	1350	1050	10	410	50
400	1390	1090	12	420	43
500	1400	1100	17	420	15**
600	870	720	20	280	45

(Fuente: (Atlas Steels Technical Departament, 2013, pág. 49).)

Nota: *En la condición del recocido bajo la norma ASTM A582, se especifica 262 HB como dureza máxima. Otras propiedades son solamente típicas y dependerá de la composición exacta y los detalles del tratamiento térmico. **Debido a la baja resistencia al impacto asociada, este acero no debe ser templado en el rango de 400 – 580°C.

- **Composición Química**

Composición química del acero inoxidable 416 se encuentra detalla en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Composición química de los aceros inoxidables martensíticos.

Composición Química									
Grado	%C	%Mn	%Si	%Cr	%P	%S	%Mo	%Ni	%N
416	0.15 máx.	1.25 máx.	1.00 máx.	12.0-14.0	0.06 máx.	0.15 min	-	-	-

(Fuente: (Atlas Steels Technical Departament, 2013, pág. 49).)

1.5.4.2. Aplicaciones

El acero inoxidable 416 tiene excelentes características, es muy recomendable para ser maquinado, se puede emplear en la fabricación de ejes para bombas centrífugas, válvulas, tornillo de avance, hojas de cuchillos, instrumentos dentales y quirúrgicos, piñones y un sin número de elementos para toda la industria.

2. METODOLOGÍA

2.1. Introducción

En la Figura 2.1., se indica el diagrama de la metodología experimental que se tiene que seguir desde la recepción del material o elemento para aplicar el proceso de metalizado HVOF, hasta la entrega del elemento recuperado según los requerimientos que se necesiten.

Figura 2.1. Diagrama de la metodología experimental.

(Fuente: Propia)

Para el desarrollo de la metodología experimental se indica el procedimiento paso a paso en el desarrollo del proceso HVOF, desde la preparación de la superficie hasta la realización de los ensayos para medir las propiedades mecánicas de la capa metalizada.

Los ensayos que se van a realizar para recopilar información acerca de las propiedades mecánicas del recubrimiento son los ensayos de adherencia, ensayos de dureza, control de dimensión y análisis metalográfico.

2.2. Metodología experimental del proceso HVOF

En la investigación se desarrollará bajo un enfoque mixto, contemplando el aspecto cualitativo y cuantitativo del proceso experimental. La recolección de información se llevará a cabo, a través de la experimentación y la toma de datos del mismo mediante la recolección de las muestras requeridas para el ensayo de dureza, ensayo de adherencia y ensayos metalográficos.

La metodología experimental describe como se tiene que dar el proceso HVOF para metalizar el eje de acero inoxidable, tomando como referencia algunos autores y desarrollos experimentales, los mismos que han puesto en conocimiento sus estudios.

Mediante la recopilación de información se tendrá un método ordenado de llevar el proceso, detallando paso a paso la forma de aplicar mediante las normas correspondientes en cada uno de los casos.

De acuerdo a las normas indicadas en el proyecto de investigación y de acuerdo a las capacidades, condiciones (factibilidad) de la empresa auspiciante ITMECA, el desarrollo de la metodología experimental será de la siguiente manera:

2.3. Preparación de la superficie

Como el principal objetivo del proyecto de investigación es el de aplicar el proceso de metalizado HVOF bajo el estudio y caracterización, para esto se llevará a cabo la metalización por HVOF en probetas maquinadas del eje de acero inoxidable martensítico de grado 416.

Antes de realizar el proceso HVOF, se debe codificar las probetas, preparar la superficie para el depósito del recubrimiento (sustrato). Para la preparación de la superficie consta desde su limpieza de partículas y contaminantes hasta la generación de un perfil de anclaje con su grado de rugosidad para un óptimo proceso de metalizado.

El sustrato para ser formado y este cumpla con sus especificación dimensionales, debe cumplir con la eliminación de material contaminado o extraño donde se hará la aplicación del revestimiento.

2.3.1. Codificación para las probetas.

Para desarrollo del proyecto de investigación en la medición de las propiedades que presenta el recubrimiento hemos asignado una codificación, para el registro de la información que entrega cada probeta, para el análisis de resultados, para que así sean manejables y sencillos los procedimientos a seguir en los ensayos.

En el caso de los ensayos de adherencia tenemos 5 pares de probetas, de los cuales 4 pares para aplicarle el proceso HVOF y 1 par para medir adherencia de la resina sin aplicar el proceso, clasificadas por pares, por el desarrollo del ensayos que se los realiza por par de piezas, pero el analices se lo hace individualmente. En el caso de los ensayos de dureza y análisis metalográfico, tenemos dos plaquitas de acero inoxidable 416.

2.3.1.1. Codificación de las probetas para los ensayos de Adherencia.

1 – A y 1 – B

1: El número 1, índica el número de qué par de probetas se trata dentro de los 6 juegos de pares que hay para el ensayo de adherencia.

A: La letra A, es la probeta a metalizar.

B: La letra B, es la probeta que no se va a metalizar.

Nota: el juego de probetas numero 5 no se va metalizar, se va a utilizar para medir la adherencia de la resina.

En la Figura 2.2., tenemos la codificación designada para el primer par de probetas, que se aplicaran los ensayos de adherencia.

Figura 2.2. Codificación del Par de probetas número 1, con la pieza A y B.

(Fuente: Propia)

2.3.1.2. Codificación de las probetas para el ensayo de dureza y análisis metalográfico.

P – 1 y P – 2

P: La letra P significa que es una probeta para el ensayo del análisis metalográfico y el ensayo de microdureza.

1: El número identifica una de las placas.

En la Figura 2.3., tenemos la codificación designada para las plaquitas, probetas que servirán para los ensayos de dureza y análisis metalográfico.

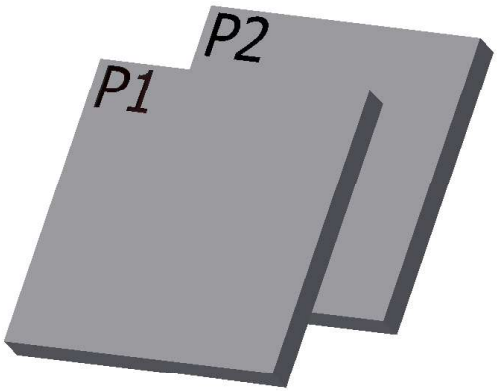


Figura 2.3. Codificación de las placas P1 y P2.

(Fuente: Propia)

2.3.1.3. Maquinado de las probetas para los ensayos de adherencia

La construcción de las probetas para los ensayos de adherencia se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa IMETCA, se utilizó los tornos para el maquinado del eje de acero inoxidable martensítico 416 para obtener las probetas. El eje pertenece a una bomba centrífuga que se detalla en el Anexo II. El eje que se maquinó se encuentra en el estado que se indica en la Figura 2.4., y Figura 2.5.

Figura 2.4. Parte del eje donde se acopla al motor eléctrico.

(Fuente: Propia)

Figura 2.5. Parte donde se une el eje con el rodete.

(Fuente: Propia)

Como acotación en la industria petrolera el uso de bombas centrífugas es muy común, pero al querer sustituir el eje lleva a un problema, se debe importar para poderlo cambiar. La importación en nuestro país no se da inmediatamente. Entonces la mejor opción sería optar por mecanizarlos y devolverle las dimensiones de trabajo.

Se maquinó en el torno 5 pares de probetas con las dimensiones establecidas en la norma ASTM C633. Mostrando cada uno de los pasos desde la Figura 2.6., hasta la Figura 2.9.

Figura 2.6. Cilindrado y refrentado.

(Fuente: Propia)

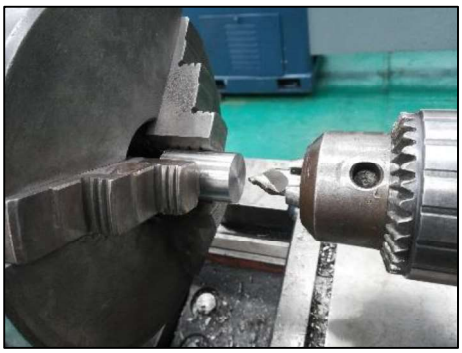


Figura 2.7. Centro con broca de centros.

(Fuente: Propia)

Figura 2.8. Agujero con broca 16 mm.

(Fuente: Propia)

Figura 2.9. Rosca con machuelo M16X2.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.10., se muestra los 5 pares de probetas que serán utilizadas en los ensayos de adherencia, de los cuales a un par no se le aplicará el metalizado para poder medir la resistencia de la resina.

Figura 2.10. Probetas para los ensayos de adherencia.

(Fuente: Propia)

2.3.1.4. Maquinado de las probetas para ensayo de dureza y análisis metalográfico

Del eje de acero inoxidable martensítico 416 se maquinó para las probetas de adherencia, con la parte sobrante como la podemos observar en la Figura 2.11. Para la medición de dureza de microindentación y el análisis metalográfico se maquinó en placas de 40 mm x 30 mm aproximadamente con un espesor de 4 mm.

Figura 2.11. Parte sobrante del eje.

(Fuente: Propia)

De igual manera se utilizó las instalaciones de la empresa, para maquinar las placas con las dimensiones anteriormente descritas. En la Figuras 2.12., y la Figura 2.13., se indica el proceso de mecanizado para obtener las placas a partir del eje de acero inoxidable.

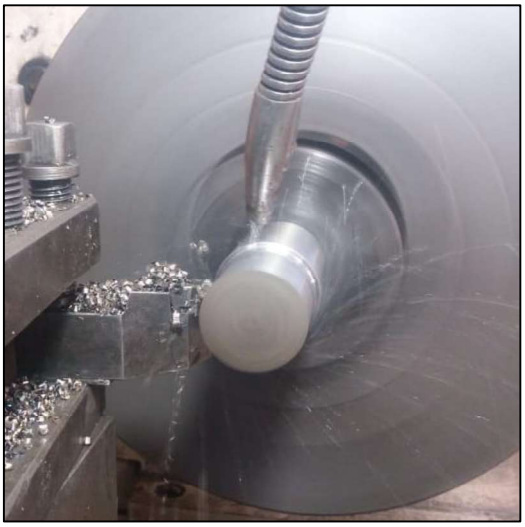


Figura 2.12. Cilindrado y refrentado en torno.

(Fuente: Propia)

Figura 2.13. Planeado del material.

(Fuente: Propia)

Después de planear el eje y transformarlo en una placa larga, se obtuvo dos placas como se indican en las Figuras 2.14. y la Figura 2.15., con las medidas correspondientes.

Figura 2.14. Placa con código P1.

(Fuente: Propia)

Figura 2.15. Placa con código P2.

(Fuente: Propia)

En el desarrollo del análisis metalográfico del recubrimiento mediante el proceso HVOF, se obtiene la sección transversal de probetas con el recubrimiento que muestren el sustrato y el recubrimiento.

2.3.2. Limpieza

El proceso HVOF está relacionado con una correcta limpieza, factor de suma importancia para el resultado final del proceso. La limpieza está normalizada por algunas asociaciones internacionales, siendo la más conocida y la cual vamos a emplear, es la norma Americana SSPC (Steel Structures Painting Council, Pittsburgh USA). (CYM, 2015).

2.3.2.1. SSPC-SP-1: Especificación de Preparación de la Superficie N°1 – Limpieza con Solventes.

1. **Alcance**

La norma SSPC-SP-1 abarca los requisitos para la aplicación de la limpieza con solvente de superficies de acero.

2. **Definición**

Este método elimina todas las materias extrañas como: sustancias visibles de aceites, polvos, grasa y entre otras ubicadas en la superficie del acero. La aplicación de esta especificación va ser antes de la aplicación de la norma SSPC-SP-5 / NACE N°1, junto con la preparación del sustrato.

3. **Preparación de la superficie antes y después de la limpieza con solvente**

Antes de la limpieza con solvente, se utiliza una combinación de objetos para eliminar materia extraña, puede emplear un cepillo de alambre con solventes limpiadores, después de realizar esta limpieza proseguir a enjuagar con agua dulce.

Después de realizar la limpieza con solvente, extraiga la materia extraña. Los métodos con los que puede realizar y que son aceptable son: limpieza con aire comprimido o aspiración.

4. **Métodos de limpieza con solvente**

El método debe eliminar el aceite que contiene la pieza, de origen de fábrica o de la pieza en uso, que se va utilizar es el siguiente.

Limpiar la superficie frotando con trapos o cepillos húmedos con solvente, para su limpieza posterior emplear solventes limpios y trapos. En la parte final, retirar la materia extraña con aire comprimido, o algún procedimiento ya mencionado.

5. **Inspección**

El trabajo realizado bajo esta norma estará sujeto a una inspección oportuna por parte del representante del proceso de metalizado. Para la limpieza con solventes, se deberá detallar en un documento dicha aplicación. En caso de afirmación, se prosigue con la aplicación del siguiente grado de limpieza. (SSPC COM, 2004).

2.3.2.2. SSPC-SP-5 / NACE N°1: Norma de preparación de superficies para juntas – Limpieza con chorro abrasivo – granallado / arenado de metal blanco.

1. **General**

La norma cubre requisitos para la limpieza de superficie de aceros con chorro abrasivo, entrega la condición final de la superficie y su verificación. En los puntos del 1 al 7 modificadas, se encuentra estipulados los requisitos obligatorios para la preparación de la superficie con chorro abrasivo. Este tipo de limpieza entrega el mayor grado de limpieza, se lo va utilizar para la aplicación del proceso HVOF, el cual se necesita tener una superficie de anclaje y así mejorar la adhesión para la aplicación del recubrimiento.

2. **Definiciones**

Para la aplicación de la limpieza con chorro abrasivo, es muy importante aplicar la limpieza con solventes, ya que al observar debe estar libre de aceite, grasa, polvo y otras materias extrañas.

3. **Procedimientos antes de la limpieza**

Antes de la aplicación de la limpieza con chorro abrasivo, se deberá aplicar la limpieza con solventes para la eliminación de toda sustancia extraña ubicada en la superficie (SSPC-SP 1) y entre otras aplicaciones de limpieza.

4. **Métodos de limpieza de explosión y operación**

Se usa aire comprimido seco y limpio, el uso de separadores de humedad, de aceite, y entre otras partes es necesario para lograr tal requisito. Los siguientes métodos son permitidos usar para la limpieza de la superficie con chorro abrasivo y se detalla a continuación:

- Granallado abrasivo seco usando aire comprimido, boquillas de chorro y abrasivo.
- Granallado abrasivo seco utilizando un sistema abrasivo de recirculación de ciclo cerrado con aire comprimido, boquilla de chorro y abrasivo, con o sin vacío para la recuperación de polvo y abrasivo.
- Granallado abrasivo seco utilizando un sistema abrasivo de recirculación de ciclo cerrado con ruedas centrífugas y abrasivo.

5. **Abrasivos de limpieza por explosión**

El tamaño de la granalla se va seleccionar de acuerdo al grado y condición de la superficie de acero a realizar la limpieza, permitiendo así tener una superficie o un perfil de anclaje y reciclando la granalla utilizada.

Una limpieza en la superficie y la recolección de la granalla con su respectivo tamaño se debe mantener para garantizar el cumplimiento de esta norma.

El estado de la granalla debe estar seco y libre de sustancias contaminantes como lo determina los métodos de prueba que describe la norma SSPC-AB 1, SSPC-AB 2 y SSPC-AB 3.

Cualquier suceso con los abrasivos, contaminantes o el grado de incrustación permitida se deben incluir en los documentos del proceso, que cubren el trabajo. El motivo está en que si posee contaminantes pueden no ser aceptables para algunos requisitos del servicio.

Al instante de especificar el recubrimiento para el proceso HVOF, la superficie debe estar completamente limpia o también conocido como sustrato. Hay que acotar algo muy importante, que el espesor de la capa de recubrimiento por encima de los picos de la rugosidad debe ser el recomendado para obtener la protección dada.

6. **Procedimientos posteriores a la limpieza rápida e inmediatamente antes del recubrimiento**

En la redacción de la parte de la limpieza, ya detallamos que en primera instancia se debe realizar el método SSPC-SP 1, de ahí proseguir con el método posterior.
Posterior al método de limpieza por material abrasivo o granallado, cualquier imperfección o daño en el perfil de anclaje debe ser corregido, para evitar futuros problemas con el recubrimiento. Algún oxidó visible en la superficie del material después de la limpieza, se debe volver a limpiar estas áreas de óxido para un correcto punto de roció entre sustrato y recubrimiento.

7. **Inspección**

Los métodos aplicados están regidos bajo la inspección, la persona en realizar el proceso es el responsable de establecer los requisitos y condiciones, se deberá registrar en documentos, en los cuales su procedimiento estará bajo acuerdo mutuo entre comprador y el vendedor. En el documento realizado para la inspección, se detalla la responsabilidad de dicha acción la cual será bajo declaración juramentada que certifica el cumplimiento del método de limpieza con material abrasivo. (SSPC COM, 2004).

2.3.2.3. Aplicación de la limpieza en las probetas

La limpieza es muy importante en la parte experimental, ya que influye en la preparación del sustrato, la limpieza se hizo para retirar partículas y contaminantes en la zona a granallar. La limpieza está bajo la norma americana SSPC-SP-1 (Especificación de preparación de la superficie N°1 - Limpieza con solventes). En la Figura 2.16., tenemos la aplicación de la limpieza a las probetas para realizar el metalizado.

Figura 2.16. Limpieza de las probetas para realizar el metalizado.

(Fuente: Propia)

Para el granallado se emplea la norma americana SSPC-SP-5 / NACE N°5 (Norma de preparación de superficies para juntas – Limpieza con chorro abrasivo – granallado / arenado de metal blanco).

2.3.3. Enmascaramiento

El metalizado por HVOF se lo realiza en lugares deseados, donde se requiere un enmascaramiento muy preciso para proteger el área junto a la zona de destino. Para evitar que el exceso de material y partículas de recubrimiento lo rocíen. (Pawlowski L. , 2008).

Hay algunas técnicas, pero las más comunes a utilizar para este proceso son:

2.3.3.1. Enmascaramiento con metal sombra

El espesor del enmascaramiento va de dos a tres veces mayor que el espesor del recubrimiento, se la coloca en la parte que no se quiere metalizar y dejándola libre el área que sí. Cuando se realiza la proyección, se acumula en la máscara el recubrimiento y se impide alcanzarle al material, para posteriormente retirarlo con facilidad.

2.3.3.2. Enmascaramiento con cinta

Hay un sinnúmero de cintas en el mercado, los cuales se puede utilizar para el enmascaramiento. Algunas son de uso para proteger del material abrasivo y otras para la proyección térmica, las mejores cintas tienen la tenacidad suficiente para resistir impacto y altas temperaturas que se dan en el proceso de metalizado y en el de preparación de la superficie. La ventaja de usar uno de estos métodos, es el que se puede retirar con facilidad después del proceso y deja la superficie protegida limpia y bordes limpios y ordenados.

2.3.3.3. Aplicación del enmascaramiento en las probetas

El proceso HVOF es una aplicación que se realiza en zonas específicas, si fuera un elemento para volverlo a emplearlo, se necesitaría cubrir las zonas no expuestas al proceso para evitar el contacto con el recubrimiento, por lo tanto para las probetas empleadas en la parte experimental no es necesario su enmascaramiento.

2.3.4. Granallado

Este proceso abrasivo trata de generar una superficie rugosa, este método se lo detalla en la especificación SSPC – SP 5 / NACE N° 1, la idea es tener un perfil de anclaje para el recubrimiento. Los materiales de abrasión más utilizados para los procesos de metalizado por HVOF, son los óxido de aluminio y limaduras de hierro fundidos en forma redondas. Las presiones de aire para el granallado van desde 210 hasta 620 kPa, con distancia de trabajo de 50 a 150 mm, con una apertura de boquilla de 6 a 10 mm de diámetro, el ángulo de impacto delas partículas debe ser de 90°.

El granallado debe ser aplicado de una manera uniforme para evitar la inclusión de grano en la superficie. Las recomendaciones para la selección de tamaño de grano se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tamaños de granos para el granallado en procesos de metalizado.

Rugosidad	Tamaño de grano (Malla)	Tamiz de apertura (mm)	Aplicaciones
Gruesa	-10 / +30	2.007 / 0.610	Para recubrimientos superiores a 0.25 mm (0.010 in) y mejor adherencia.
Media	-14 / +40	1.422 / 0.432	Para la adherencia justa y acabados más suaves de los recubrimientos de menos de 0.25 mm (0.010 in) de espesor.
Fina	-30 / +80	0.610 / 0.175	Para acabados más suaves sobre recubrimientos de menos de 0.25 mm (0.010 in) de espesor para ser utilizado

(Fuente: (Robert C. Tucker, 1994, págs. 1446 - 1471).)

2.3.4.1. Selección de la granalla

En la selección de la granalla o material abrasivo, se debe tener en cuenta: el perfil de anclaje que es un factor importante para la adherencia entre el sustrato y el polvo, parámetros que brinda el equipo HVOF, etc. Tomando en consideración los aspectos anteriores y las ventajas que entrega el material abrasivo, el óxido de aluminio (Al_2O_3) por sus idóneas características se utilizará para la preparación de la superficie.

La granalla no se destruye a pesar que se usa elevadas presiones de aires contra sustratos con mayor dureza. Se tiene dos grados en el óxido de aluminio, C (áspero) y F (fino). Una combinación idónea será tener mezclas iguales, con pequeñas adiciones repetitivas de grado C, con la finalidad de mantener equilibrio en la mezcla. Como ejemplos los granos del óxido de aluminio de malla 240 y 150 se muestra en las figura 2.17. (a) y figura 2.17. (b) respetivamente.

(a) (b)

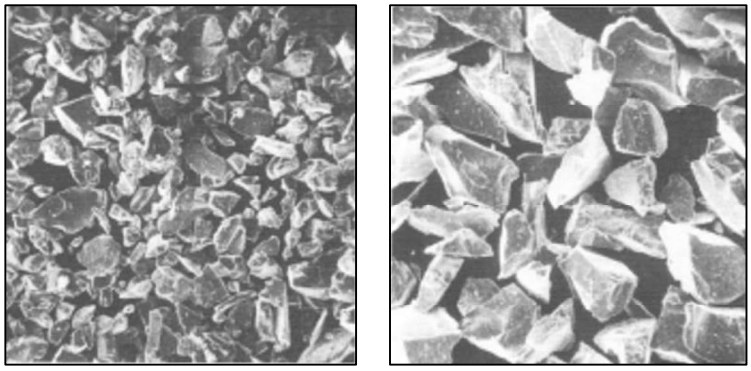


Figura 2.17. Granos de ($\mathrm{Al_2O_3}$) con malla (a) 240 y (b) 150. Aumento 130X.
(Fuente: (Handbook, 2004, pág. 114).)

La granalla a base de óxido de aluminio es usada para superficies demasiadas duras, con durezas mayores a 45 HRC y en materiales no ferrosos donde granitos de acero podrían causar efectos de corrosión. (Itzel Deynny & Ramírez Pérez, 2010).

2.3.4.2. Óxido de aluminio ($\mathbf{Al_2O_3}$)

El tipo de granalla que vamos a utilizar, es el óxido de aluminio que viene por sacos como se puede apreciar en la Figura 2.18. Elfusa es la empresa que distribuye la granalla, se la obtiene de importación desde Brasil.

Figura 2.18. Granalla de óxido de aluminio de malla 16.

(Fuente: Propia)

ALOMIX es a base de óxido de aluminio obtenido a partir de la fusión reductora de bauxitas de alta calidad y este material proveniente del tratamiento magnético del óxido de aluminio marrón. En relación entre costo / beneficio es una gran alternativa económica. Los granos se clasifican de acuerdo con las normas ANSI o FEPA. Datos técnicos véase en el Anexo IV.

- **Propiedades físicas del Óxido de aluminio.**

La granalla del tipo ALOMIX – L (Macro) (ver Anexo IV) de la empresa ELFUSA se va emplear para la preparación del sustrato. Es un producto compuesto de óxido de aluminio, extraído a través de la fusión reductora de bauxitas de alta calidad. Su relación costo / beneficio es excelente, el tamaño de grano se clasifica de acuerdo a las normas ANSI o FEPA. (ELFUSA, 2018).

Se puede observar las características generales en la Tabla 2.2., el análisis químico en la Tabla 2.3., y la densidad aparente en la Tabla 2.4., influyendo en el resultado final para el rendimiento abrasivo.

Tabla 2.2. Características Generales del ALOMIX – L (Macro).

Densidad Especifica Real	Friabilidad (ANSI – B74.BR2007)	Color	Polvo	Reutilización
4.2 g/cm³	59%	Marrón	Baja	Buena

(Fuente: (ELFUSA, 2018).)

Tabla 2.3. Análisis Químico por FRX (%) del ALOMIX – L (Macro).

Al_2O_3	TiO_2	SiO_2	Fe_2O_3
85,1	2,5	3,8	7,3

(Fuente: (ELFUSA, 2018).)

Tabla 2.4. Densidad aparente del ALOMIX – L (Macro).

Grano / Malla	(L) Angular
16	1,71

(Fuente: (FEPA 44 - 1, 2006).)

2.3.4.3. Equipo de granallado

El granallado se lo realiza bajo la norma SSPC-SP-5 / NACE N°1 ya mencionada en la sección de limpieza, es importante detallar los parámetros, equipos y material abrasivo para el método de limpieza por granalla. Ya que el control de estos factor va influenciar en la obtención del sustrato. El manual de operación del equipo de granallar esta adjunto en el Anexo V. El equipo de granallado tiene las siguientes especificaciones que se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del equipo de Granallado.

Especificaciones	
Marca:	SCHMIDT
Modelo:	3.5 CF
Capacidad:	3.5 ft³
Serie no.:	18L – 5950 CRN
Presión:	150 psi (10.3 bar)

(Fuente: (SCHMIDT, 2018).)

Como se puede observar en la Figura 2.19., el equipo incluye protección operaria referenciada por RPB Safety, y este equipo está compuesto de un casco de protección NOVA 3, de un filtro RADEX para limpieza de aire, manguera de conexión entre filtro y el casco de protección tiene una longitud de 50 pies y un traje de granallado especial RPB. Más detalles y características están en el Anexo V.

Figura 2.19. Equipo de granallado.

(Fuente: Propia)

Para aplicar la limpieza con material abrasivo, se lo debe aplicar en cabinas. La ventaja de la granalla de Al_2O_3 ante otras granallas es que su gravedad es menor, esta cualidad hace que la granalla sea acelerada a través de la boquilla.

2.3.4.4. Parámetros utilizados en el granallado

Durante la parte experimental para obtener un perfil de anclaje adecuado para el proceso de metalización, los parámetros con los que se trabajó en el granallado son los que se indican en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros en el granallado para preparar el sustrato.

Parámetros del Granallado	
Material abrasivo	Óxido de Aluminio
Tamaño del grano (Malla)	16
Presión	(90 – 120) Psi
Distancia de trabajo	80 mm
Apertura de boquilla	11 mm
Ángulo de impacto	90°

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.20., podemos observar cómo se realizó el granallo en una de las probetas, con un ángulo de impacto de 90 grados.

Figura 2.20. Granallado en las probetas.
(Fuente: Propia)

2.3.5. Perfil de anclaje.

Una vez que se aplique los métodos de limpieza SSPC – SP – 1 y SSPC – SP – 5 / NACE N°1, la adhesión del recubrimiento en el sustrato debe producirse satisfactoriamente, para que esto funcione el perfil de anclaje va ser el resultado directo del tamaño del grano del material abrasivo utilizado. En parte a la rugosidad que presenta el perfil de anclaje va ser requerida para una unión adecuada y que pueda estar bajo las consideraciones del espesor del recubrimiento.

2.3.5.1. Especificación de acabados superficiales.

El documento que regula las cuestiones relativas para la designación, control y medición de la textura superficial es la norma (ANSI B46.1, 2009). Aquí se especifica diversos aspectos de la textura de la superficie, como la especificación del lápiz para la medición de rugosidad, estandariza símbolos de textura, etc. Se expresan en unidades de micras (µm) o microinch (mil).

2.3.5.2. Granulometría recomendada.

El tamaño de grano o malla que recomienda la sección (SSPC-SP COM, 2004) para el óxido de aluminio se detalla en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Perfil de anclaje para el óxido de aluminio (Al_2O_3).

PERFIL DE ANCLAJE					
Abrasivo	25 µm 1 mil	37 µm 1.5 mil	50 µm 2 mil	63 µm 2.5 mil	75 - 100 µm 3 – 4 mil
Arena de silicio	Malla 30/60	Malla 30/60	Malla 30/60	Malla 30/60	Malla 30/60
Granalla de acero	G80	G50	G40	G40	G25
Granalla de explosión	S110	S170	S280	S330	S390
Garnet	Malla 80	Malla 36	Malla 36	Malla 16	Malla 16
Óxido de aluminio	Malla 100	Malla 50	Malla 36	Malla 24	Malla 16

(Fuente: (SSPC-SP COM, 2004, págs. 2-24).)
Nota: Estas alturas de perfil son típicas si la presión de la boquilla está entre 620 y 700 kPa (90 a 100 psi).

2.3.5.3. Equipo para la medición de rugosidad

Para la determinación del perfil de anclaje se lo puede realizar uno de estos tres instrumentos de medida como un comparador de superficies, rugosímetro y una cinta de medición (réplica).

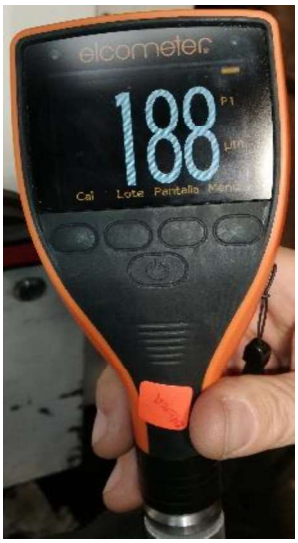
En este caso se utilizó un medidor de superficies portátil después de granallar cada una de las probetas. Los valores de rugosidad se muestra en la Tabla 2.8., las características del rugosímetro están en la Tabla 2.9., para ver si el sustrato tiene el perfil de anclaje adecuado o hace falta de granallar más tiempo.

Tabla 2.8. Análisis de rugosidad en el sustrato

Análisis de Rugosidad	
Perfil de anclaje	(172 – 175) µm
Instrumento de medición	Rugosímetro Elcometer
Observaciones	Revisar perfil de anclaje a todas las muestras

(Fuente: Propia)

Tabla 2.9. Especificaciones técnicas del medidor de perfil de superficie.



Especificaciones	
EQUIPO	Medidor de perfil de superficie
MARCA	Elcometer
MODELO	E224C - TI
RANGO	0 – 500 µm
APRECIACIÓN	0.01 mm

(Fuente: Fuente Propia).

En la Figura 2.21., se puede observar unas de las probetas terminadas, lista para poder metalizar. Después de granallar cada una de las probetas, se envuelve en papel aluminio para evitar que las probetas se contaminen.

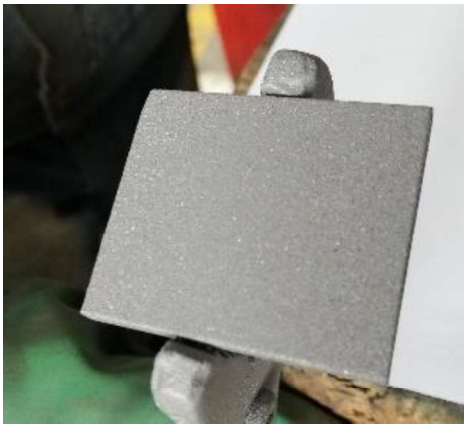


Figura 2.21. Granallado de la placa P1.

(Fuente: Propia)

2.4. Metalizado por HVOF

Teniendo el material del eje definido, la granalla a utilizar para la preparación del sustrato, el tipo de polvo para el recubrimiento, ya lista la superficie para aplicar el proceso HVOF, el proceso de metalizado va depender de ciertos factores a considerar para que el recubrimiento tenga las características solicitadas, debido a su adhesión y grado de dureza. Factores que involucran son el equipo a utilizar, parámetros de presiones de flujos de los gases, destrezas del operador para realizar el proceso, etc.

2.4.1. Montaje de las probetas para metalizar

Para evitar estar metalizando probeta por probeta, se decidió construir un sujetador peculiar como se indica en la Figura 2.22., para todas las probetas para realizar los ensayos de adherencia, el cual permita realizar el metalizado sin preocupación a que se vayan a mover. Después de construir el sujetador de las probetas, de los 5 pares de probetas para ensayar, se puso únicamente la pieza A, por ejemplo del par número 1, únicamente se ubicó la probeta 1A y así solo teniendo 4 piezas de probetas se van ubicando las piezas 1A, 2A, 3A y 4A.

Figura 2.22. Ubicación de probetas 1A, 2A, 3A y 4A.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.23., y Figura 2.24., se tiene todas las probetas, listas para metalizar por HVOF.

Figura 2.23. Probetas 1A, 2A, 3A y 4A.

(Fuente: Propia)

Figura 2.24. Placas P1 y P2.

(Fuente: Propia)

2.4.2. Proceso previo para aplicar HVOF

Una correcta forma de aplicar el proceso HVOF, es inmediatamente después de la preparación de la superficie. El sustrato preparado está totalmente expuesto a la contaminación, el contacto con objetos extraños y huellas dactilares van afectar gravemente la adherencia del recubrimiento. Por estos motivos se recomienda hacer el proceso inmediatamente.

Si es el caso de querer almacenar la pieza con el sustrato listo para metalizar, se lo puede hacer en un área libre y seca con una temperatura aproximada 40 ° C (100 ° F). (Handbook, 2004, pág. 115)

2.4.2.1. Precalentamiento del sustrato

De acuerdo a la ubicación del sector en el cual se llevará a cabo el proceso, el clima en la ciudad de Quito es seco no hace falta realizar un precalentamiento para la humedad, pero para el precalentamiento al sustrato sí.

Esta técnica de precalentamiento al sustrato previo al metalizado, es muy aceptable, el cual se va evitar inconvenientes, para su correcto uso es necesario tener en cuenta sus precauciones y limitaciones. El fin del precalentamiento es tener una superficie seca y sin humedad para que las primeras partículas de recubrimiento que impacten, así el sustrato se contraiga con recubrimiento, para eliminar tensiones residuales durante el enfriamiento.

2.4.2.2. Temperaturas de precalentamiento

Como principio general para el precalentamiento del sustrato, la temperatura de aplicación va ser 100 a 150 °C (210 a 300 ° F), con un tiempo de aplicación de 60 segundos, lo que es suficiente para eliminar la humedad. (Handbook, 2004, pág. 117).

Las partículas fundidas o semifundidas se adhieren mejor en una superficie seca y precalentada, van a tener un enfriamiento despacio, a diferencia de proyectar en una superficie fría. De forma inmediata se debe realizar la metalización.

2.4.2.3. Equipo para realizar el precalentamiento

Los equipos que pueden ser, son indistintos, el encargado del proceso puede seleccionar el equipo idóneo que entregue la temperatura requerida para el precalentamiento, como ejemplo a esta aplicación se puede usar un soplete de gas que rocié uniformemente y despacio la superficie del sustrato.

Cuando no se realiza ningún precalentamiento, el autor (Handbook, 2004, pág. 117) dice que se debe almacenar a temperatura ambientes en áreas secas y con un contenido de humedad por debajo de ~ 30%.

2.4.2.4. Precalentamiento en los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se precalientan de mejor manera a una temperatura aproximadamente de 100 ° C (210 ° F). (Handbook, 2004, pág. 118). Seguido rápidamente por la aplicación de la primera pasada de material pulverizado. Se recomienda esta precaución porque estas aleaciones también forman escamas de óxido refractario que, si se deja crecer en películas gruesas, interferirán con los mecanismos de adhesión del recubrimiento

2.4.2.5. Control de temperatura sustrato/recubrimiento

Posterior al precalentamiento del sustrato, cuando se ha empezado con el metalizado, es necesario el control de la temperatura entre el sustrato y el recubrimiento para evitar la degradación, oxidación y la contracción / expansión del sustrato. (Handbook, 2004, pág. 124)

2.4.2.6. Temperatura del recubrimiento al metalizar

Mientras ocurre la metalización, el sustrato al estar con un recubrimiento depositado se calienta debido a la antorcha y las partículas pulverizadas. La técnica de metalizado va influir en el flujo térmico, así el flujo térmico para el metalizado al aire libre es de aproximadamente de $2\frac{\mathrm{MW}}{\mathrm{m}^2}$. (Pawlowski L. , 2008, pág. 253).

El flujo de convección q_c se puede expresar como:

$$\mathbf{q_c = h_c * \left(T_g - T_s \right)} \tag{2.1}$$

Donde:

$\mathrm{T_g}$: Temperatura del gas en la superficie del recubrimiento procesado.

$\mathrm{T_s}$: Temperatura real de la superficie del recubrimiento.

$\mathrm{h_c}$: Coeficiente de transferencia de calor convectiva.

El resultado del flujo va depender en gran medida de los parámetros de procesamiento en el proceso. Para valores del coeficiente de transferencia de calor convectiva tenemos la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Coeficientes de transferencia de calor.
(Coeficiente convectivo y flujos de calor radiactivo. Para diferentes distancias de pulverización de plasma atmosférico y diferentes configuraciones de enfriamiento por aire comprimido a una entrada de energía eléctrica constante de 32kW y velocidad de flujo de los gases de trabajo, Ar + H2 (70 + 15 slpm), según (Pawlowski, Vardelle, & Fauchais, 1982).

N°	Parámetro de proceso	$\mathbf{h_C}\ [\boldsymbol{W/m^2K}]$	$\mathbf{q_C}\ [\boldsymbol{W/m^2}]$
1	Distancia de spray: 6 cm; rapidez del aire de enfriamiento: 110 m /s; rapidez barrera-aire, 140 m / s	$416 - 0.017\ x\ T_S$	3470
2	Distancia de spray, 10 cm; sin enfriamiento; sin barrera	$1150 - 0.083\ x\ T_S$	1250
3	Distancia de spray, 10 cm; sin enfriamiento; sin barrera	$1040 - 0.113\ x\ T_S$	555

Fuente: (Pawlowski, Vardelle, & Fauchais, 1982).
Nota: Las temperaturas en las ecuaciones de regresión se expresan en °C

2.4.2.7. Parámetros empleados previos al metalizado HVOF

Antes de empezar a metalizar se recomienda calentar el sustrato, en la Tabla 2.11., tenemos los parámetros que se emplearon en el proceso de HVOF.

Tabla 2.11. Parámetros a controlar previo al proceso de metalizado.

Precalentamiento		
Temperatura:		39°C
Tiempo:		30 segundos
Equipo:		TeroJet AC
Humedad:		Debajo del 30%
Control de temperatura para aplicar el proceso		
Temperatura del recubrimiento:		< 100°C
Distancia:		23 cm
Con enfriamiento:	SI	**Sin enfriamiento:**

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.25., se muestra el precalentamiento al sustrato de las probetas, precalentamiento que se lo hace por unos 60 segundos como máximo y no sobrepasar los 100°C, temperatura recomendada para aceros inoxidables.

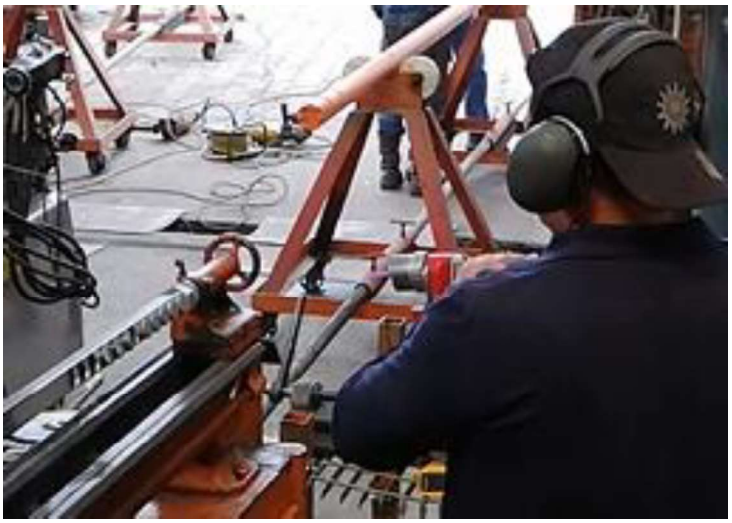


Figura 2.25. Precalentamiento de las probetas.

(Fuente: Propia)

2.4.3. Equipo para el metalizado por HVOF

El equipo que se debe emplear para el desarrollo del proceso HVOF adecuado va estar especificado bajo la norma (AWS C2.21/C2.21M, 2015). La que describe una especificación para la inspección de aceptación de equipos de proyección térmica.

El equipo del proceso HVOF es similar al convencional. Sin embargo el equipo para HVOF que utiliza combustión interna, van a necesitar un sistema de enfriamiento activo. Los componentes del equipo para la metalización por HVOF (Handbook, 2004) describe los siguientes elementos:

- Sistema de gases: Oxígeno O_2, Gas combustible, etc. Consiste en gases de gran volumen.
- Mangueras de gas de alta presión, reguladores de flujo de gases y controles de gas de alto flujo.
- Arrancadores de retroceso en la pistola y los reguladores.
- Pistola de metalizado HVOF (Cámara de combustión, inyector de polvo y boquilla).
- Sistema de refrigeración por aire o agua.
- Sistema de alimentación del polvo a alta presión.
- Enclavamiento de seguridad y purga de consola.

Para una aplicación adecuada del proceso HVOF, va estar ligada al rendimiento del equipo. Debe estar funcionando de acuerdo con la especificación del fabricante y los estándares para brindar una calidad de metalizado en el eje de acero inoxidable. (AWS C2.21/C2.21M, 2015).

El Operador del proceso HVOF, es el que se encarga de operar el equipo de metalizado para que el proceso tenga las características deseadas mediante el control de parámetros establecidos en este proyecto de investigación, además el operador para el proceso debe contar con la calificación y certificación bajo el procedimiento de la norma (AWS C2.16/C2.16M, 2017). Que es la Guía para la calificación del operador de metalizado.

Para realizar el metalizado por HVOF se empleó el equipo TeroJet AC Eutectic, y el recubrimiento carburo de tungsteno con 12% de cobalto (WC – 12Co), en la Tabla 2.12., tenemos las especificaciones del equipo de metalizado, y en el Anexo VI todas las características del equipo de metalizado.

Tabla 2.12. Especificaciones técnicas del equipo de metalizado por HVOF.

Especificaciones	
MARCA:	Eutectic
EQUIPO:	TeroJet
MODELO:	AC
EFICIENCIA DEPOSITO:	70%
POLVO:	WC – 12Co
TASA:	5 lb/h

(Fuente: Propia)

2.4.4. Parámetros del proceso HVOF

Para explicar los parámetros del proceso de metalizado por HVOF, clasificaremos de la siguiente manera, en tres puntos:

1. Parámetros de movimiento
2. Parámetros en el empleo de gases
3. Parámetros para el material de recubrimiento

Los parámetros de la parte experimental del proceso HVOF, están resumidas en tablas al final de cada punto descripto.

1. PARÁMETROS DE MOVIMIENTO

Para asegurar la calidad del recubrimiento y brindarle al operador las condiciones necesarias de protección, se debe llevar un control de movimiento.

1.1. Patrón de metalizado

Con el área localizada a metalizar, se lo debe realizar de manera uniforme por el operador del proceso, el operador mantendrá la pistola lo más perpendicular posible al eje en rotación como indica la Figura 2.26.

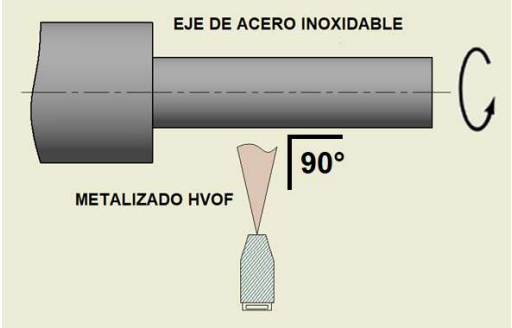


Figura 2.26. Proyección Aceptable.
(Fuente: Propia)

Se puede dar una variación en el ángulo de proyección, el ángulo de impacto mínimo aceptable es de 45° con respecto al eje, este se debe usar como último recurso, considerando que se van a tener una desviación de las propiedades del recubrimiento (ver la Figura 2.27.)

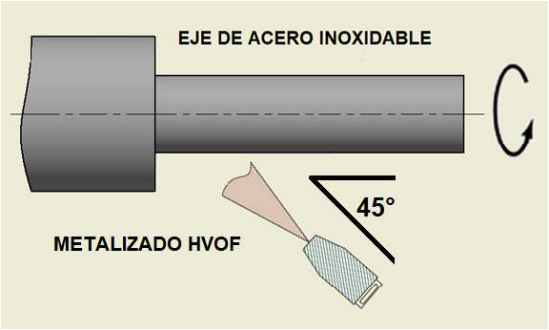


Figura 2.27. Proyección mínima aceptable.
(Fuente: Propia)

Tener en cuenta que al utilizar el ángulo de 45°, la resistencia a la unión como la cohesión, se verá comprometida con el aumento de la porosidad, se recomienda emplear la proyección aceptable.

Si la geometría de la pieza a metalizar tuviera cambios de sección, la proyección será siempre perpendicular al del eje, durante todo la parte de la proyección se debe mantener con este patrón, pero se puede tener una pequeña variación de 90º ± 20º, va ser una variación aceptable por parte del operador. (Handbook, 2004, pág. 125).

1.2. Distancia de metalizado entre pistola-sustrato

Se debe mantener una distancia constante durante todo el proceso de metalizado, ya que tal parámetro es independientemente del movimiento de la pieza, para garantizar las condiciones adecuadas del recubrimiento. (Handbook, 2004, pág. 124).

La distancia de metalizado va variar y estar en un rango de 120 a 250 mm, con el patrón descrito anteriormente. (Bhushan, 2001).

1.3. Movimiento relativo pistola-sustrato.

Para que los pases proyectados cumplan con los requisitos de recubrimientos óptimos, se debe seguir como se indica en el patrón metalizado, el objetivo es tener control de la proyección sobre la superficie del sustrato, que se genere de una manera uniforme y repetitiva.

El movimiento relativo se lo puede visualizar como la pieza girando y la pistola trasladándose de forma lineal paralela al eje. Para determinar el movimiento relativo se debe tomar en cuenta que cada pasada se tiene un segmento de recubrimiento, se puede observar en la Figura 2.28.

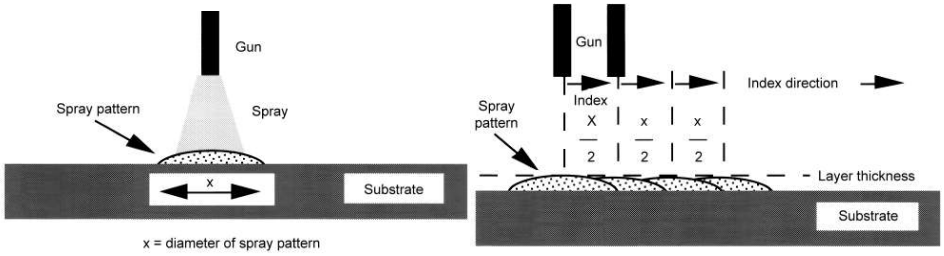


Figura 2.28. Movimiento relativo pistola-sustrato.

(Fuente: (Handbook, 2004))

En la Figura 2.28., de la derecha se observa que aproximadamente la mitad del diámetro del patrón es superpuesto en cada avance de la pistola, esto se va realizar como movimiento relativo para producir una capa de recubrimiento y continua. Una pasada a lo largo del eje en la superficie del sustrato se considera como una capa completa, y múltiples pases darán el espesor deseado. Si el movimiento tanto del sustrato y de la pistola se configuran de manera errónea, el recubrimiento va tener capas gruesas después de cada pasada.

El metalizado por HVOF es un caso especial y se debe tomar las consideraciones, como el rango de velocidad entre pistola y sustrato estará en el rango de (45 – 122 m/min) ó (150 – 400 ft/min). En la deposición del proceso HVOF con carburos generalmente se limita a 12 µm (0,0005 in) por pase, tomando todas estas pautas se tiene control con el sobrecalentamiento del sustrato durante el proceso de metalizado. (Handbook, 2004, pág. 125).

Para los parámetros de movimiento del proceso HVOF, de la parte experimental, se indica en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Parámetros de movimiento.

Parámetros de movimiento para el proceso					
Patrón de metalizado			90° ± 20°		
Distancia pistola-sustrato			230 mm		
Movimiento relativo P-S			1.45 mm/seg		
Numero de pases:	350	Tiempo entre pases:	0.5 seg	Tiempo total:	176 seg
Área proyecta		5362 mm²			

(Fuente: Propia)

2. PARÁMETROS EN EL EMPLEO DE GASES

Los medios de trabajo del proceso, son los gases empleados como combustible, por ejemplo el Queroseno se utiliza como combustible en el equipo del proceso HVOF denominado JP-5000 (Praxair ST) y se atomiza antes de la combustión. Se identificará los gases empleados en el proceso HVOF, tales como sus parámetros que son la presión, caudal y consumo para optimizar el proceso.

La boquilla o llamada como orificio crítico viene a formar parte importante del proceso de metalizado, tiene una forma peculiar de disco con una apertura axial. Este elemento viene a ser parte en un accesorio por el cual fluye el gas que se controlará.

Según el autor (Sakaki & Smimizu, 2001) se deben utilizar los siguientes perfiles de boquillas: Barril convergente; una boquilla convergente-divergente; un barril convergente-divergente. Van influir en el patrón de metalizado, flujo de la flama y su velocidad.

2.1. Tipos de gases empleados

Los gases empleados en el proceso de metalizado HVOF son el Hidrogeno (H_2), Oxígeno (O_2), Propano (C_3H_8), Argón (Ar), Nitrógeno (N_2), Aire, Acetileno (C_2H_2), Queroseno y también se tiene gases registrados con marcas como MAPP (Metilacetileno), Apache y Crylene. (Handbook, 2004).

En la Figura 2.29., tenemos los gases empleados en el proceso HVOF, que son: el propano, el nitrógeno y el oxígeno, gases con características peculiares en el proceso.

Figura 2.29. Gases utilizados en el proceso.

(Fuente: Propia)

2.2. Presión de gases

La presión en la cámara de combustión en una pistola para el proceso HVOF alcanza hasta los 4 MPa según describe el autor (Dvorak & Torday, 1996), la presión de combustión es directamente proporcional con la velocidad de las partículas proyectadas. Las presiones mayores a los 4 MPa, se emplea para recubrir cables por su alto grado de viscosidad como lo menciona el autor (Browning , Matus, & Richter, 1995).

En el HVOF se tiene dos clases de dispositivos para la metalización, de acuerdo a la presión de la cámara de combustión, la primera clase denominada como alta velocidad, va en presiones que superan a los 241 Kpa (35 psi) con entradas de calor de 527 MJ (500,000 Btu) que son valores nominales. La segunda clase también conocida como hipervelocidad

se opera con valores nominales en rangos de (620 – 827Kpa) (90-120 psi) con entradas de calor aproximados de 1 GJ (1 millón de Btu), al usar el queroseno, se acompaña con aire u oxígeno para la combustión. (Handbook, 2004, pág. 57).

2.3. Flujo o caudal de gases

En el proceso de la investigación tenemos flujos de gas con velocidades elevadas a diferencia de los procesos convencionales. Las unidades de medición paras los flujos de gas son: pies cúbicos de gas por hora o sus siglas en inglés, Standard cubic feet of gas per hour (scfh) y las unidades de litros estándar por minuto (sLm).

En el proceso HVOF con presiones bajas los flujos de gas combustible de hidrocarburos son de valores de 66 sLm (140 scfh), con un flujo del oxígeno de 283 sLm (600 scfh), un flujo de hidrogeno en el rango de (660 – 850 sLm) (1400 – 1800 scfh), los valores son nominales. (Handbook, 2004, pág. 58).

2.4. Consumo de gases

Por lo general el consumo de gases se da por la combustión de ellos en una cámara, en la que son desplazados por una boquilla de precisión a través de la cual la combustión sale de la pistola de metalizado. Debido al gran flujo másico de gas conjuntamente con temperaturas elevadas producidas por la combustión de los gases, se tiene velocidades en rangos de 1525 a 1825 m/s o lo que equivale a (5000 – 6000ft/s) en la salida de la boquilla. (Handbook, 2004, pág. 57).

La presión y el consumo en la aplicación del proceso HVOF son los valores que se indica en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Parámetros de gases empleados en la aplicación HVOF.

Parámetros en los gases para el proceso				
Gases	Propano	Nitrógeno	Oxigeno	Aire
Presión (PSI)	90	75	150	120
Caudal (SCFH)	50	35	260	-
Consumo (m^3)	0.069	0.048	0.360	-

(Fuente: Propia)

3. PARÁMETROS PARA EL MATERIAL DE RECUBRIMIENTO

3.1. Velocidad de alimentación

Un parámetro importante como punto crítico es el control de la velocidad de alimentación del material de recubrimiento para el proceso de HVOF, a diferencia de los procesos convencionales. Se vuelve un punto crítico por que los dispositivos son más sensibles a la cantidad de polvo que se les agregue. Para el proceso HVOF, el consumo de alimentación volumétrico se tiene aproximadamente a un rango de 6 a 9 cm^3/min (0.37 a 0.55 in^3/min). (Handbook, 2004).

3.2. Estimación del consumo de material a proyectar

Estimar la cantidad de polvo de carburo de tungsteno para el recubrimiento es importante para la parte de costos, se lo puede hacer con el siguiente procedimiento gradual:

1. Calcular el área de la superficie a metalizar, de acuerdo a la forma de la pieza.
2. Calcular el volumen, esta cantidad se refiere al valor obtenido en el área de superficie a metalizar por el espesor de recubrimiento que se va aportar.
3. Calcular el peso teórico del polvo para el recubrimiento, de acuerdo con las especificaciones del fabricante se obtiene la densidad del polvo pero considerando que la densidad del recubrimiento aplicado es menor al del polvo, la estimación va ser un 90% de la densidad del polvo. El peso será el producto del volumen con el 90% de la densidad del polvo.
4. Calcular el peso real de polvo para el recubrimiento, para una estimación correcta se debe considerar la eficiencia de deposición, el peso real de polvo a utilizar, será la relación del peso teórico del polvo para la eficiencia de deposición.

Para valores nominales en la eficiencia de deposición, como tasa de pulverización se tiene a partir de los fabricantes de los polvos, ellos entregan las características necesarias del material a utilizar como recubrimiento. Los valores reales varían de acuerdo al equipo empleado, los parámetros empleados, habilidades del operador, geometría de la pieza a metalizar, etc. (Bhatia, 1999, pág. 14).

Los parámetros aplicados para el proceso HVOF en la parte experimental se indica en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Parámetros del recubrimiento.

Parámetros del recubrimiento del proceso	
Polvo:	WC – 12Co
Velocidad de alimentación:	0.85 gr/seg
Consumo estimado:	332 gr
Consumo real:	150 gr

(Fuente: Propia)

El consumo real es el que se obtuvo en la aplicación del proceso HVOF, y el consumo estimado es el que se esperaba a partir de la velocidad de alimentación nominal del equipo TeroJet AC.

2.4.5. Control de temperatura y espesores en el proceso HVOF

En la Figuras 2.30., y Figura 2.31., se indica el control de las temperaturas en el recubrimiento que es aportado a las probetas y placas.

Figura 2.30. Control de temperatura en el recubrimiento de las probetas.
(Fuente: Propia)

Figura 2.31. Control de temperatura en las placas P1 y P2.
(Fuente: Propia)

De acuerdo a la norma ASTM C633, a las probetas para los ensayos de adherencia se les aportó recubrimiento de un espesor de 0.38 mm aproximadamente. Para los ensayos de dureza y los ensayos metalográficos no indican un espesor, se le entregó a las placas un mismo espesor que las probetas. En la Figura 2.32., y Figura 2.33., se tiene la medición del espesor con el medidor portátil de marca Elcometer.

Figura 2.32. Espesor del recubrimiento en las probetas para adherencia.
(Fuente: Propia)

Figura 2.33. Espesor en Placas P1 y P2.
(Fuente: Propia)

Para llevar el control del metalizado por HVOF se elaboró una hoja de proceso donde abarcan todos los parámetros del proceso, la hoja de proceso se encuentra con todos los datos en el Anexo VII.

2.4.6. Eficiencia de deposición en el proceso HVOF

La eficiencia del depósito se define como el porcentaje de material rociado que realmente se deposita en una superficie plana grande.

Los parámetros mencionados anteriormente influyen directamente proporcional en la calidad del recubrimiento. La eficiencia en la deposición la denominaremos con las siglas ED, se caracteriza en que la gran parte del porcentaje de partículas serán proyectadas en el sustrato, sin consideraciones de exceso.

Por ejemplo la eficiencia en la deposición se puede calcular a partir de la velocidad de alimentación del polvo (lb/h) que entrega el equipo HVOF, midiendo la masa del polvo introducido en el equipo HVOF antes y después de aplicar el proceso, tomando en cuenta el tiempo de aplicación del metalizado.

Del diseño del polvo o material de recubrimiento va tener un punto crítico y deseado para la ED, se puede tener partículas finas, gruesas o una mezcla. La ED bajas resultan menos

económicos, dando largos tiempos de operación en equipo y personal con espesores mayores de recubrimientos. (Handbook, 2004, pág. 126).

En la Tabla 2.16., se muestra los parámetros utilizados para el cálculo de la eficiencia de deposición realizados en la parte experimental del proceso HVOF. El ED se obtuvo a partir de las velocidades de alimentación del equipo TeroJet AC y la velocidad de alimentación real.

Tabla 2.16. Eficiencia de deposición ED.

Eficiencia de deposición (ED)	
Velocidad de alimentación del Equipo TeroJet AC:	1.89 gr/seg
Tiempo total de metalizado:	176 seg
Consumo estimado:	332 gr
Velocidad de alimentación real:	0.85 gr/seg
Consumo real:	150 gr
ED (100%)	55%

(Fuente: Propia)

La inspección se lo realizó desde la preparación de la superficie hasta la aplicación del proceso, para verificar que se cumpla los requisitos de las normas correspondientes, así entregar en óptimas condiciones la pieza metalizada. El personal calificado a cargo fue el Ing. Juan Carlos Araujo de la empresa ITMECA, inspeccionó paso a paso en el proceso del metalizado HVOF.

2.4.7. Operaciones posteriores al proceso HVOF

El proceso de metalizado por HVOF debe finalizar con el terminado de la pieza para distintas aplicaciones industriales. Aquí se entrega la pieza, con sus dimensiones toleradas y rugosidad de las superficies de los recubrimientos. Para la operación más común e idónea para terminar el proceso de metalizado por HVOF, se debe tener en cuenta que la selección de la operación se analiza de acuerdo al grado de dureza del recubrimiento, el acabado y la tolerancia dimensional requerida para la pieza. Un mecanizado adecuado para este proceso va ser el rectificado, la que permite la dimensión deseada y el pulido deseado. (Pawlowski L. , 2008).

Para recubrimientos cerámicos o duros, se emplea ruedas de diamante y nitruro de boro cubico (CBN), para matrices metálicas con materiales compuestos de refuerzo de carburo, se pueden rectificar con ruedas de carburo de silicio (Ibrahim & Sampath, 1996).

El recubrimiento entregado por el proceso HVOF, se la puede modificar cuando la variación del espesor es excesiva. Por lo general, se recomienda que para cada pase de desbaste debe tener un espesor de recubrimiento final que no varié más de 0.001 in (0.025 mm). (ASTM C633, 2013).

La norma ASTM C633 indica que la tasa de eliminación es insignificante en la magnitud del daño para el recubrimiento. Una forma adecuada es utilizar una piedra de rectificar con un mandril magnético. Posterior a este proceso de rectificación no se debe utilizar ningún otro tratamiento.

2.5. Ensayos mecánicos

2.5.1. Ensayo de dureza de microindentación

Para la comprobación de un correcto proceso, la medición de microdureza se emplea en estos procesos de aporte de recubrimientos, proceso sencillo y no tan polémico como los ensayos metalográficos. El ensayo de dureza Vickers es una prueba estándar de microdureza recomendada para los procesos de proyección térmica. Mientras el ensayo de dureza de microindentación Knoop se la emplea con menos frecuencia. (Handbook, 2004).

2.5.1.1. Prueba de Dureza Vickers

La prueba prácticamente consiste en usar una pirámide de diamante cuadrada como indentador, con un ángulo de 136° entre sus caras opuestas, conocida también como dureza de pirámide de diamante (DPH). Esta prueba de dureza se encuentra contenida en la norma ASTM E384. (Handbook, 2004).

ASTM E384 – 07: Método de prueba estándar para la dureza de microindentación de materiales.

Alcance: La norma ASTM E384, cubre la determinación de la dureza de microindentación de los materiales. Ensayos de microindentación realizadas con penetradores Knoop y Vickers. Además, esta norma añade un análisis sobre las posibles causas en la generación de errores que se puedan suscitar durante la prueba de microindentación. La norma

entrega la información y calibración de los bloques de prueba de dureza de referencia Vickers y Knoop que se encuentran en la norma ASTM E92. (ASTM E384 - 17, 2017).

ASTM E92: Método de prueba estándar para la dureza Vickers de materiales metálicos.

Alcance: Esta norma pretende abordar la determinación de la dureza Vickers para materiales metálicos, mediante la verificación de la prueba de dureza con máquinas y calibración con bloques de prueba de dureza estandarizados.

Según el autor (Kalpakjian & Schmid, 2008) indica que la carga está en el rango de 1 Kg a 120 Kg, las impresiones que se tienen son menores a 0.5 mm (0.020 in) en su diagonal. Esta prueba es adecuada para materiales con alto rango de dureza y aceros tratados térmicamente. En la figura 2.34., podemos observar el indentador pirámide de diamante.

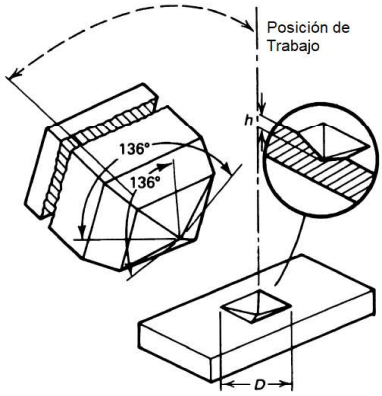


Figura 2.34. Indentador Pirámide de Diamante.

(Fuente: (Handbook, 2004))

2.5.1.2. Probetas para el ensayo de dureza de microindentación

Para las probetas se debe metalizar en unas plaquitas de 40 mm x 30 mm con un espesor de 4 mm, las dimensiones pueden variar. Los parámetros del proceso serán los mismos que en las probetas de adherencia.

Tanto para el ensayo de dureza de microindentación y el de análisis metalográfico se debe elaborar muestras de las placas metalizadas por HVOF. Se debe realizar cortes de las placas metalizadas aproximadamente de 10 mm x 5 mm, una de las caras de las muestras debe contener el recubrimiento como se indica en la Figura 2.35., las muestras se montan conjuntamente con una resina de color verde (Phenolic Mounting Powder) en una prensa de montaje (SimpleMet 2).

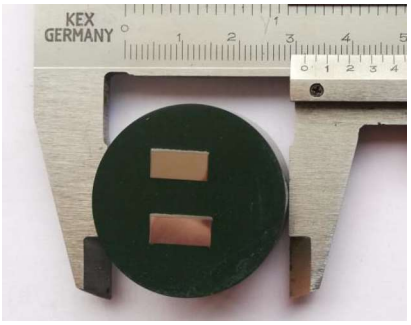


Figura 2.35. Muestras para el ensayo de dureza de microindentación.

(Fuente: Propia)

2.5.1.3. Equipos para el ensayo de dureza de microindentación

Los ensayos de dureza de microindentación se realizaron en la universidad San Francisco de Quito en los laboratorios de ingeniería mecánica, con un equipo de marca Wilson Hardness, modelo VICKERS 432 SVD. Este equipo utiliza fuerza hidráulica para la aplicación de la carga y además cuenta con un microscopio en el cual tiene una regla graduada, la cual permite medir la longitud de la diagonal luego de la indentación, entregando el resultado en el display. Las especificaciones más importantes del equipo se muestra en la Tabla 2.17. En cada una de las muestras se realizaron 12 mediciones de microdureza eliminando el mayor y menor valor para poder calcular un promedio con las 10 medidas restantes.

Tabla 2.17. Especificaciones técnicas del Microdurómetro.

Especificaciones	
EQUIPO:	Durómetro
MARCA:	Wilson Hardness
MODELO:	VICKERS 432 SVD
VICKERS ESCALA:	HV0.3 – HV30
CARGA DE PRUEBA:	0.3 – 30 Kgf
CARGA MÍNIMA [gr]:	Sistema Hidráulico
INDENTADOR:	Indentador de punta de diamante y geometría piramidal de base rómbica
DISPLAY:	Análogo

(Fuente: Fuente Propia).

2.5.1.4. Preparación de las muestras para los ensayos de dureza

Una vez metalizadas las dos placas (P1 y P2) como se indica en la Figura 2.36., se saca muestras de cada placa para realizar los ensayos de dureza de microindentación.

Figura 2.36. Placas metalizadas por HVOF (P1 y P2).

(Fuente: Propia)

Para la preparación de las pastillas con las muestras seleccionadas de cada placa se realizó los siguientes pasos:

Paso 1: Selección de muestras

Las placas metalizadas se las lleva al laboratorio para hacer cortes con la sierra de precision (IsoMet 1000), en la Figura 2.37., se muestra la sierra de presicion y en la Figura 2.38., se muestra los cortes realizados en las placas P1 y P2.

Figura 2.37. Sierra de precisión (IsoMet 1000).

(Fuente: Propia)

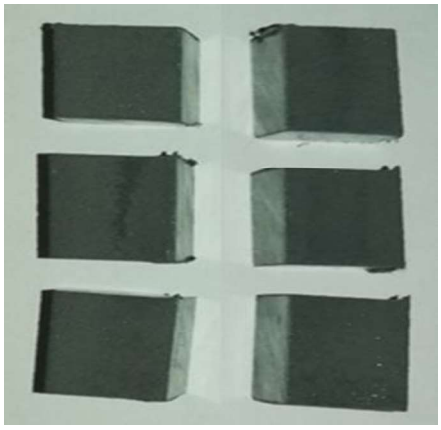


Figura 2.38. Muestras de las placas P1 y P2.

(Fuente: Propia)

Paso 2: Empastillamientos de las muestras

Para empastillar las muestras seleccionadas, las cuales fueron dos de cada placa metalizada, se utilizó una resina de nombre Phenolic Mounting Powder de color verde (ver Figura 2.39), después se montó las muestras seleccionadas en la prensa hidráulica de marca BUEHLER (ver Figura 2.40.). Se utilizó una carga de 4200 psi, con una temperatura de 149 °C por 7 minutos. La zona para analizar será la sección transversal, entre el sustrato y del recubrimiento.

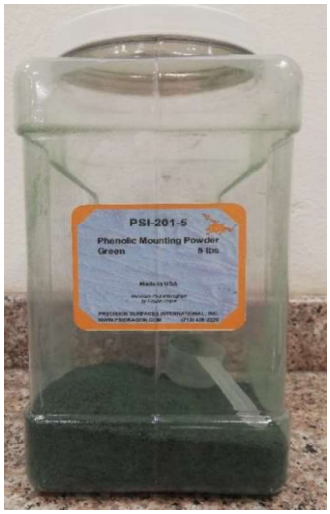


Figura 2.39. Resina Phenolic Mounting Powder.
(Fuente: Propia)

Figura 2.40. Prensa Hidráulica BUEHLER.
(Fuente: Propia)

Por medio de la prensa hidráulica obtenemos las dos pastillas que contienen las muestras para los ensayos de dureza de microidentacion. Las dos muestras de cada placa se pueden ver en la Figura 2.41.

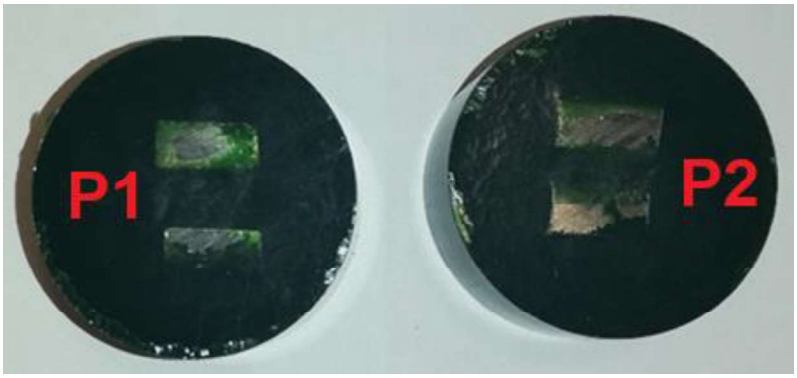


Figura 2.41. Pastillas con muestras de las placas P1 y P2.
(Fuente: Propia)

Para terminar con tener listas las muestras, se va a preparar las superficies, estas deben estar bien lisas y que permitan hacer la observación y la aplicación de las cargas en el microdurómetro.

Paso 3: Desbastes y preparacion final de las muestras

Se utiliza la pulidora manual para empezar a hacer los desbastes, que sirven para tener superficies planas del material y tener zonas lisas, es decir que un espesor de 0.2 a 2 mm se va eliminar. Este paso se lo realizó con las lijas 240, 320, 400 y 600 grit, deslizando las pastillas por cada una de las lijas, desde arriba hacia abajo con el fin de obtener líneas en una sola dirección. La pastilla debe girar 90° cada vez que se cambie de lija, las especificaciones de la pulidora manual está en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Especificaciones técnicas de la pulidora manual.

Especificaciones	
EQUIPO:	Pulidora manual
MARCA:	BUEHELER
MODELO:	HandiMet 2
ABRASIVO [grit]:	Lijas de 240, 320, 400 y 600
MEDIO DE ENFRIAMIENTO:	Agua

(Fuente: Fuente Propia).

Para el pulido final, se completó en la pulidora semiautomática como se indica en la Tabla 2.19., se puso sobre el plato lijas de 15 y 6 micras, son la pulidora semiautomática encendida, se empezó a pulir en el plato con la lija de 15 micras, de las misma forma que en la pulidora manual, puliendo en una sola dirección y al cambiar del plato rotar 90°.

Después asegurando un paño sobre unos de los platos y utilizando alúminas de 1 y 0.5 micras, repitiendo el mismo proceso anterior hasta logras tener las muestras sin líneas y lisas.

Tabla 2.19. Especificaciones técnicas de la pulidora semiautomática.

Especificaciones	
EQUIPO:	Pulidora Semiautomática
MARCA:	BUEHELER
MODELO:	MetaServ 250
MOTOR ELECTRICO [VAC]:	115
ABRASIVO:	**Pulido Grueso:** Lija de 15 µm Lija de 6 µm **Pulido Fino:** Alúmina de 1 µm Alúmina de 0.5 µm
MEDIO DE ENFRIAMIENTO:	Agua

(Fuente: Fuente Propia).

2.5.2. Ensayo de adherencia

Los recubrimientos tienen forma compleja y están unidos al sustrato por lo que no se puede realizar las mediciones directamente, de lo cual se deriva métodos en los cuales se determina fuerzas adhesivas y cohesivas.

La fuerza resultante de adhesión o cohesión esta expresada por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{A}}\ [\mathbf{MPa}] \tag{2.3}$$

Donde, F viene dado por la carga máxima en newtons y el área o la superficie de adhesión se representa con la letra A y en milímetros cuadrados. (SHIGLEY & MISCHKE, 2002).

ASTM C633: Método de prueba estándar para adhesión o fuerza de cohesión de recubrimiento de pulverización térmica.

El ensayo de adhesión se describe como lo indica la norma ASTM C633 (ver Anexo VIII), está adaptada para aplicarlas en recubrimientos por proyección térmica, que abarca los procesos HVOF. (ASTM C633, 2013).

En el ensayo de adhesión son muy importantes los elementos que se mencionan en la norma ASTM C633, como lo es la resina o conocido también como agente adhesivo, la elaboración del juego de probetas y el procedimiento que se indica después.

2.5.2.1. Probetas para el ensayo de adherencia bajo la norma ASTM C633

Cada muestra del ensayo corresponde a una probeta con el proceso HVOF, fijándole a un dispositivo de carga. La probeta como se muestra en la Figura 2.42., es de forma cilíndrica con una longitud no menos de 1.5 in (38.1 mm).

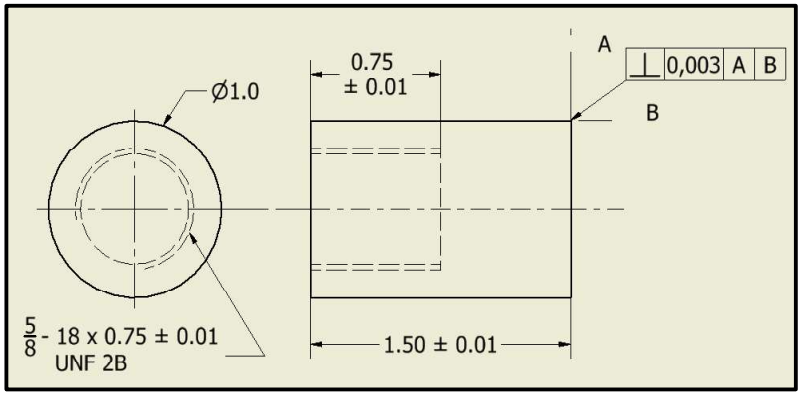


Figura 2.42. Probeta para el ensayo de Adherencia.

(Fuente: Propia)

El modelo de la probeta tiene un diseño sugerido como se indica en la Figura 2.43, y este diseño se emplea para el montaje en los accesorios, fijándose a los dispositivos de carga, la intensidad de las cargas están bajo la capacidad de la máquina de ensayos, teniendo un valor permisible menor al 1%.

El tamaño de la muestra para el ensayo corresponde al propósito de la investigación, pero el número de muestras para que el ensayo sea aceptable, se va a utilizar un número no menor a cinco pares de probetas. (ASTM C633, 2013).

Figura 2.43. Modelo de la probeta para el ensayo de adherencia.

(Fuente: Propia)

2.5.2.2. Procedimientos en la realización de los ensayos de adherencia

1. Aplicar la metodología del proceso HVOF para todos los juegos de probetas preparadas para el ensayo y designación de un código para identificar a cada par de probetas.
2. Elaborar un juego de probetas sin aplicar el proceso HVOF para medir la fuerza de adhesión de la resina de unión.
3. Preparar la resina o agente adhesivo para cada uno de los pares de probetas y curarlas en un horno de acuerdo a la especificación del fabricante de la resina.
4. Montar un par de probetas, acoplando las probetas en el dispositivo de auto-alineación. Después montar en el equipo de ensayos para la medición de adherencia.
5. Aplicar cargas de tracción con una velocidad uniforme de desplazamiento de la cabeza entre 0.030 in/min (0.013 mm/s) y 0.050 in/min (0.021 mm/s) hasta llegar a la ruptura y registrando la carga máxima aplicada, como se puede observar en la Figura 2.44. Después realizar las mediciones para cada una de los 5 pares de probetas (con y sin recubrimiento). (ASTM C633, 2013).

Figura 2.44. Carga aplicada hasta llegar a la ruptura.
(Fuente: Propia)

Todos los aspectos para el desarrollo del ensayo de adherencia, se encuentran adjunta en el Anexo VIII.

2.5.2.3. Equipos para el ensayo de adherencia

Se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos mecánicos Marca Tinius Olsen modelo Super L. perteneciente a la universidad San Francisco de Quito, en los laboratorios de la Escuela de Ciencias e Ingeniería del departamento de Ingeniería Mecánica. Los datos

obtenidos del ensayo se reportan de manera digital mediante el software NAVIGATOR. Podemos ver las especificaciones técnicas del equipo en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20. Especificaciones de la máquina universal de ensayos mecánicos.

Especificaciones	
EQUIPO:	Máquina universal de ensayos
MARCA:	Tinius Olsen
MODELO:	Súper L
CAPACIDAD:	150 kN
APLICACIÓN DE CARGA:	Sistema Hidráulico
DISPLAY:	Digital
REPORTES DE DATOS:	Software NAVIGATOR

(Fuente: Fuente Propia).

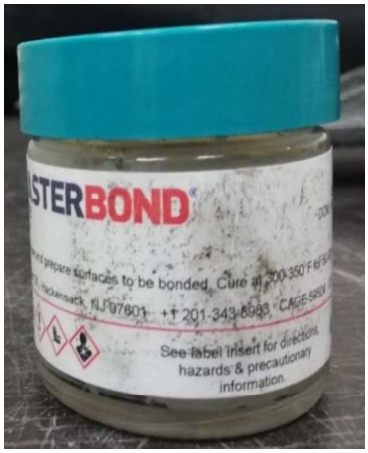
2.5.2.4. Agente adhesivo (Resina de vinculación)

La resina para la aplicación de la norma ASTM C633, es seleccionada en mutuo acuerdo por el comprador y fabricante. Esta resina debe ser capaz de unir el recubrimiento al dispositivo que va montado en el equipo de medición, en donde se va efectuar una carga con una resistencia a la tracción tan grande como el valor mínimo que se requiere para la adhesión y cohesión. El agente adhesivo o agente de vinculación, va ser lo suficiente viscoso para no penetrar una capa de recubrimiento del valor de 0.015 in (0.38 mm). (ASTM C633, 2013).

Nota: si en el caso de emplear otra resina, se hará una comparación con una resina ya comprobada en el método de pulverización térmica deseada.

Las propiedades típicas de la resina EP15 Master Bond (ver Anexo IX) se encuentran en la Tabla 2.21, la resina se aplicó con un pincel, cubriendo toda la superficie del recubrimiento de la probeta con un espesor 1.5 mm aproximadamente, uniendo a la probeta del juego, ósea si se le aplico resina a la probeta 1A, el juego de probeta para unir es la 1B.

Tabla 2.21. Propiedades de la resina EP15 Master Bond.



Propiedades Típicas	
Gravedad especifica:	1.45
Resistencia a la tracción:	12 – 14 Ksi
Módulo de tracción:	400 – 450 Ksi
Dureza:	80 – 90 Shore D
Tiempo de curado:	60 – 90 min
Temperatura de curado:	300 – 350 °F

(Fuente: Fuente Propia).

2.5.2.5. Aplicación de la resina en las probetas

Para la preparar las probetas para el ensayo de adherencia bajo la normas ASTM C633, se construyó un soporte para facilitar el curado de los 5 pares de probetas que vamos a ensayar. Este soporte consta de tubos cortados con una longitud de 5 in aproximadamente, unidos uno a otro con soldadura, afirmados con apoyos traseros. En la figura 2.45., se puede observar el soporte para las probetas.

Figura 2.45. Soporte para probetas.

(Fuente: Propia)

Las superficies de unión de las probetas deben estar libres de partículas o agentes viscosos, se recomienda hacer una limpieza con ultrasonido por 10 minutos. En la Figura 2.46., se puede observar cómo se aplicó resina a todas los 5 pares de probetas, de los cuales los 5 pares de probetas, el juego A de cada par es el que contiene el recubrimiento. El sexto par solo se utiliza para testigo de la resina cumpla con la resistencia a la tracción.

Figura 2.46. Probetas con resina para curar.

(Fuente: Propia)

2.5.2.6. Curado de la resina aplicada

Una vez aplicada la resina Master Bond en cada probeta se procede a curar en un horno con características peculiares con indica la Tabla 2.22, se va a calentar el horno unos 10 minutos con la temperatura que índica el fabricante de la resina EP15 Master Bond, temperatura de (300 – 350) °F.

Tabla 2.22. Especificaciones técnicas del horno para curado de la resina.

Especificaciones	
EQUIPO:	Horno
MARCA:	Quincy Labs.
MODELO:	21 – 35OE
POTENCIA:	750 W
CORRIENTE:	6.3 A
VOLTAJE:	120 V
FRECUENCIA:	60 Hz

(Fuente: Fuente Propia).

Una vez que el horno este a una temperatura uniforme de (300 – 350) °F, ponemos el soporte con las probetas que contienen la resina para curar. El tiempo de curado como recomienda el fabricante de la resina EP15 Master Bond es de (60 – 90) minutos. Pasado el tiempo de curado en el horno se prosigue a sacar el soporte con todas las probetas utilizando unos guantes de temperatura. En la Figura 2.47., se puede observar que ya estan listas para realizar los ensayos de adherencia en la máquina de universal de ensayos.

Figura 2.47. Probetas curadas para ensayar.

(Fuente: Propia)

2.5.2.7. Montajes de las probetas en la máquina universal de ensayos

Se empieza a ensayar con el par de probetas número 5, se desarma el dispositivo de auto-alineación para facilitar el montaje del par de probeta a ensayar. La carga de tracción aplicada va ser a una velocidad constante de 1 mm/min hasta llegar a la roptura. Para demas pares de probetas se aplicará la carga que la norma ASTM C633 indica, que es una carga a una velocidad constante de desplazamiento entre 0.013 mm/seg y 0.021 mm/seg hasta que se produsca la ruptura. Ver la Figura 2.48., que muestra el montaje la muestra en el dispositivo de auto-alineacion.

Figura 2.48. Dispositivo de auto-alineación con la muestra lista.

(Fuente: Propia)

2.6. Ensayos metalográficos

Un ensayo metalográfico es el estudio que se realiza a los materiales metálicos o de aleación, con la finalidad de obtener información sobre sus propiedades físicas y mecánicas, partiendo de la interpretación de su microestructura. El procedimiento para el ensayo metalográfico se lo lleva a cabo bajo la norma ASTM E407.

2.6.1. Análisis metalográfico

Las metalografías se realizaron para el estudio de las características estructurales del acero inoxidable 416 con el recubrimiento carburo de tungsteno aportado con el proceso de metalización HVOF. La preparación metalográfica se realizó bajo la norma ASTM E407.

La metalografía aplicada para los recubrimientos por HVOF, es una técnica de magnificación óptica con la finalidad de observar las relevancias que se presenta en la microestructura. Partiendo de un corte transversal del recubrimiento, se pude diagnosticar variaciones en su microestructura a raíz del proceso de metalizado.

En el análisis metalográfico se puede observar factores muy importante para el estudio del proceso de metalizado por HVOF, ya que dichos factores están involucrados con el proceso. Mediante la metalografía se indica características como, poros, grietas, morfología de los splats, vistas en los microscópicos ópticos.

2.6.1.1. Pasos a considerar en el análisis metalográfico

Pasos importantes que debemos seguir para realizar el análisis metalográfico, lo enumeraremos a continuación:

Paso 1: Probetas analizadas

La zona de interés va ser la que se encuentra entre el recubrimiento y el sustrato, para el análisis metalográfico, que es una zona transversal de las probetas preparadas para el proceso HVOF, en la que se metalizará con carburo de tungsteno como recubrimiento a unas plaquitas elaboradas del mismo material del eje de acero inoxidable martensítico.

Paso 2: Preparación de las muestras

Como ya hemos mencionado en la parte de los ensayos de microdureza, las muestras serán las mismas tanto para el análisis metalográfico y el ensayo de dureza. Primero se

debe metalizar con el proceso HVOF en unas placas pequeñas 40 mm x 30 mm de un espesor de 4 mm, del mismo eje de acero inoxidable martensítico de grado 416. Los parámetros utilizados serán los mismos que para las probetas de adherencia.

Paso 3: Extracción de la muestra:

Seleccionar alguna zona peculiar de la probeta en el cual no se tenga irregularidades del proceso (bordes, sobre relieves, etc.), esto se hace para garantizar el proceso. La parte física de la extracción consta en utilizar un disco de corte de diamante, cortando primero el recubrimiento con velocidades bajas y enfriamiento con agua.

Paso 4: Muestra montada en una resina:

Se emplea una resina (Phenolic Mounting Powder) de color verde para envolver a la muestra (ver Figura 2.49.), y montarlas en una prensa de montaje (SimpliMet 2) que entrega temperatura y presión para solidificar la muestra con la resina.

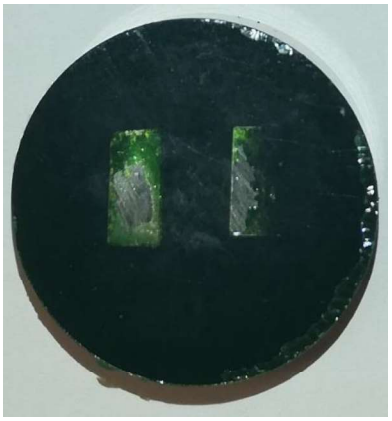


Figura 2.49. Muestras montadas en la resina.

(Fuente: Propia)

2.6.2. Equipo para el análisis metalográfico

En la realización del análisis metalográfico se utilizó el microscopio óptico de la universidad San Francisco de Quito de los laboratorios de ingeniería mecánica. Es un microscopio óptico de marca Nikon, modelo Eclipse MA100. Las especificaciones técnicas del microscopio óptico se detalla en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23. Especificaciones técnicas del microscopio óptico.

Especificaciones	
EQUIPO	Microscopio óptico Invertido
MARCA	NIKON
MODELO	ECLIPSE MA100
ÓPTICA	CFI60
LENTES	5x, 10x, 20x, 50x, 100x
CAMPO	Fijo plano de 126 mm x 80 mm
ILUMINACIÓN	6V, 30 W halógena
POTENCIA	96 VA
SOFTWARE METALOGRÁFICO	UEye Cockpit

(Fuente: Fuente Propia).

2.7. Medición de espesores del recubrimiento

La medida correcta del espesor, aumenta la calidad del proceso HVOF y disminuye los costos del uso del recubrimiento. Para la medición de los espesores en las probetas del proyecto de investigación, se va a considerar la toma de mediciones en las probetas antes del proceso HVOF y posterior.

La medición de espesor se va realizar en las probetas con recubrimiento para los ensayos de adherencia, dureza y el análisis metalográfico. Tanto con el tornillo micrométrico, con el medidor de espesor portátil y con el análisis metalográfico. Los instrumentos de medición fueron facilitados por la empresa IMETCA.

2.7.1. Medición de espesores mediante el análisis metalográfico

Para obtener la medición de los espesores del recubrimiento de carburo de tungsteno, se emplea la ayuda de tomas de fotografías con un microscopio, los modelos pueden variar, las características que entrega el microscopio es como mínimo 100x para la apreciación de la capa del recubrimiento adherida al sustrato. Se puede hacer uso de un software metalográfico ImageJ para sacar algunas mediciones de espesores a partir de las imágenes obtenidas del microscopio.

Por este método utilizaremos un software UEye Cockpit y con ayuda del microscopio óptico de marca Nikon (ver Tabla 2.23.), realizará capturas de imagen (micrografías) de la zona transversal entre el sustrato y recubrimiento a lo largo de la muestra. Con la ayuda del software ImageJ tomaremos las dimensiones necesarias del espesor del recubrimiento.

Se va a utilizar las probetas preparadas para los ensayos de dureza de microindentación y el análisis metalográfico de la sección transversal del recubrimiento carburo de tungsteno y el sustrato.

2.7.2. Medición de espesores mediante un medidor portátil

Se puede emplear un medidor de espesor de recubrimiento de marca Elcometer como se muestra en la Tabla 2.24. Es un instrumento de medición rápida para determinar espesores en la mayoría de materiales, produciendo mediciones confiables, a diferencia de tornillo micrométrico y el pie de rey, solo necesita una pared de la pieza a medir.

En un método de medición mas flexible que usar el tornillo micrométrico y la preparación metalográfica. Este instrumento de medida tiene la capacidad de tomar medidas inmediatamente y en superficies de temperaturas, trabaja muy bien con espesores de recubrimientos metálicos.

2.7.2.1. Equipo de medición

El instrumento de medida de espesor es portátil y ergonómico, es de marca Elcometer 456 y consta de un display analógico que tiene las opciones de entregar la medida inmediatamente y en cualquier unidad de medida. Las especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24. Especificaciones técnicas del medidor de espesor portátil.

Especificaciones	
EQUIPO	Medidor de espeso de recubrimiento
MARCA	Elcometer 456
MODELO	B
RANGO	0 – 31 mm
APRECIACIÓN	0.001 mm

(Fuente: Fuente Propia).

2.7.2.2. Probetas analizadas

La medición de espesor se realizará en todas las probetas con recubrimiento, realizando mediciones en zonas aleatorias de la superficie. En la Figura 2.50., se puede observar la medición en una de las probetas metalizadas para el ensayo de adherencia.

Figura 2.50. Medición de espesor del recubrimiento.

(Fuente: Propia)

2.7.3. Medición de espesores con un tornillo micrométrico

El empleo del tornillo micrométrico resulta más factible que tener un calibrador u otro instrumento de menor alcance para la medición del espesor del recubrimiento aplicado por el proceso HVOF, es más factible porque es una herramienta que entrega resultados de calidad, por su facilidad en medición a diferencia de los instrumentos mencionados.

2.7.3.1. Equipo de medición

Tabla 2.25. Especificaciones técnicas del tornillo micrométrico.

Especificaciones	
EQUIPO	Tornillo Micrométrico
MARCA	STARRETT
RANGO	25 – 50 mm
APRECIACIÓN	0.01 mm

(Fuente: Fuente Propia).

2.7.3.2. Probetas analizadas

Los elementos a utilizar para la medición de espesor son las probetas y placas previstas para aplicar el recubrimiento carburo de tungsteno con el proceso HVOF. El uso del tornillo micrométrico es mas flexible que la preparacion metalográfica, este método de medición representa un proceso de bajo costo. Las toma de datos va realizar en todas las probetas a metalizar, se tomará un valor antes de metalizar la probeta y otro valor despues del metalizado, la diferencia de dicho sera el espesor del recubrimiento en esa probeta (ver Figura 2.51.). En la Tabla 2.25., se indica las especificaciones técnicas del tornillo micrométrico.

Figura 2.51. Medición de espesor antes y después HVOF.

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el desarrollo de la metodología experimental se hicieron los ensayos de adherencia, dureza de microindentación y el análisis metalográfico, aplicando el metalizado por HVOF en probetas que se obtuvieron de un eje de acero inoxidable martensítico 416. El proceso se llevó a cabo en la empresa IMETCA con el equipo de metalizado TeroJet Eutectic.

3.1. Resultados

Para el análisis de los resultados y tener un mejor entendimiento se hizo la siguiente codificación con las muestras realizadas de cada placa metalizada, se puede observar en la Figura 3.1.

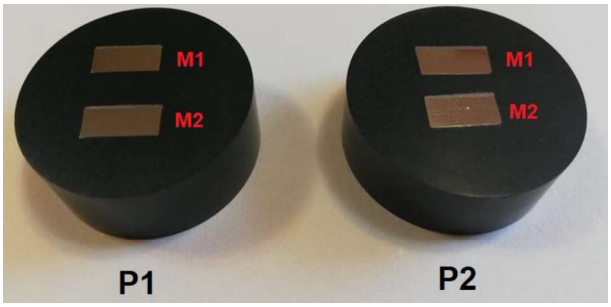


Figura 3.1. Codificación de las muestras para las metalografías.
(Fuente: Propia)

Donde P1 y P2 son las placas metalizadas, de cada placa se extrajo dos muestras representándolas con M1 y M2.

3.1.1. Resultados de los ensayos mecánicos

3.1.1.1. Resultado de los ensayos de dureza de microindentación

Los resultados del ensayo de dureza de microindentación para las muestras de la placa P1 y P2 se detalla en la Tabla 3.1., para los resultados de la medición de dureza del eje de acero inoxidable 416 están en la Tabla 3.2.

Los ensayos de dureza de microindentación fueron realizadas con una carga aplicada de 0.5 Kgf, se detalla también la dureza de Rockwell C para un futura comparación con la dureza del carburo de tungsteno que entrega el fabricante y el que se midió a partir de las muestras de las placas metalizadas.

Tabla 3.1. Resultados de la de dureza de microindentación – Placa P1 y P2.

N°	C. Aplicada (Kgf)	Placa P1		Placa P2	
		Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell (HRC)
1	0,5	414,40	42	581,00	54
2	0,5	541,00	52	457,90	46
3	0,5	363,60	37	475,70	47
4	0,5	372,40	38	399,90	41
5	0,5	365,00	37	424,20	43
6	0,5	313,90	32	478,90	47
7	0,5	404,10	41	831,20	65
8	0,5	381,50	39	566,70	53
9	0,5	500,30	49	482,20	48
10	0,5	372,60	38	342,90	35

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Resultados de la dureza de microindentación en el acero inoxidable 416.

Mediciones	Acero Inoxidable 416		
	C. Aplicada (Kgf)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell (HRC)
1	0,5	212,90	15
2	0,5	259,30	24
3	0,5	228,20	18
4	0,5	259,70	24

(Fuente: Propia)

Con los valores obtenidos de dureza del recubrimiento en las placas P1 y P2, que se detalla en la Tabla 3.1., se representó de manera gráfica en la Figura 3.2. y Figura 3.3., para indicar la diferencia de dureza entre el material del eje (acero inoxidable 416), el valor nominal del WC – 12Co según el fabricante y las durezas obtenidos del ensayo de microindentación sobre el recubrimiento WC – 12Co aplicado con el proceso de metalización HVOF. (Ver en la Figura 3.2., y la Figura 3.3.)

El respaldo de los resultados de dureza de microindentación para el recubrimiento WC – 12Co y par el eje de acero inoxidable obtenidos, se detalla en el Anexo X.

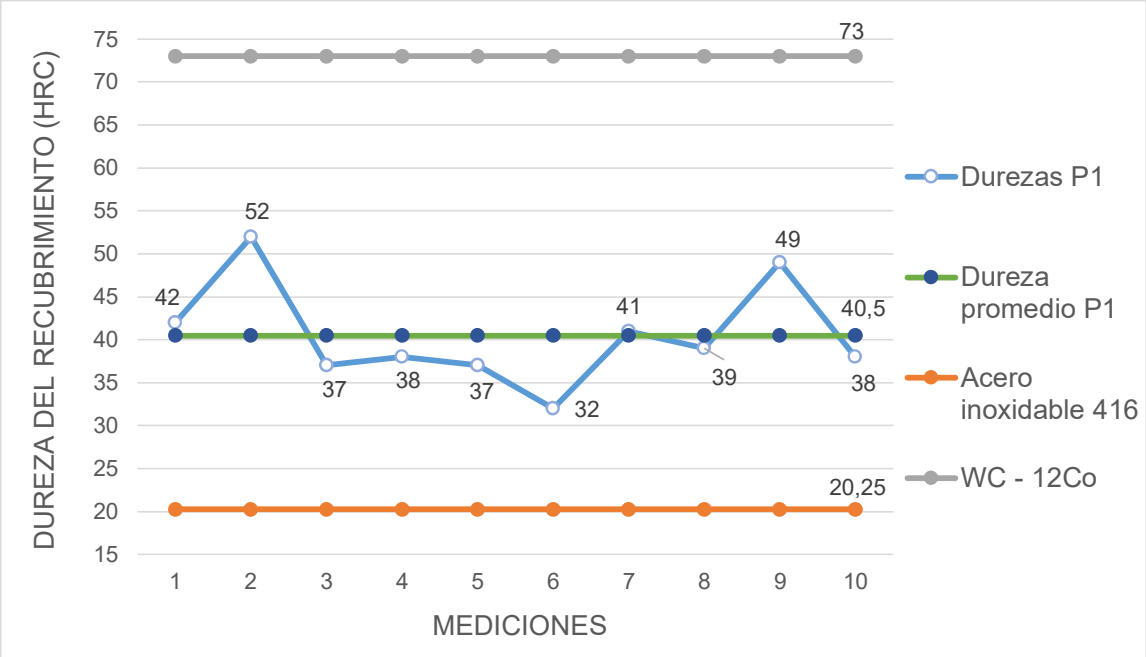


Figura 3.2. Representación gráfica de las durezas del recubrimiento en la placa P1.

(Fuente: Propia)

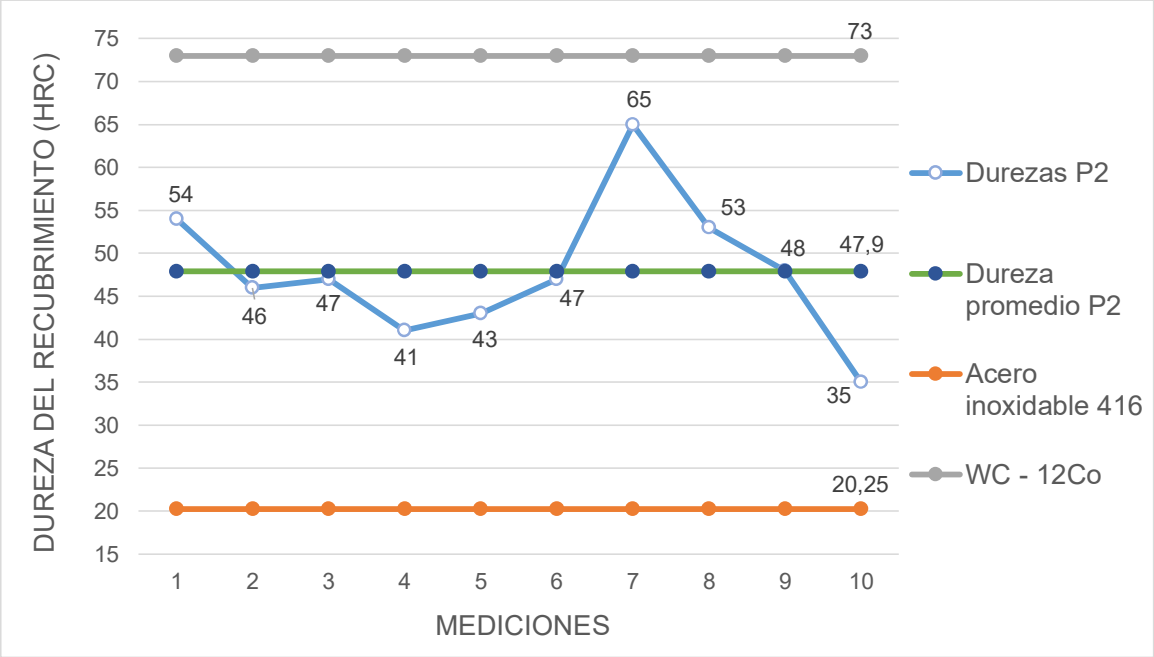


Figura 3.3. Representación gráfica de las durezas del recubrimiento en la placa P2.

(Fuente: Propia)

Los valores promedios de dureza de la placa P1 y P2 son 40.5 HRC y 47.9 HRC respectivamente. El valor nominal de dureza del WC - 12Co es de 73 HRC según el fabricante. La dureza medida del eje de acero inoxidable 416 es de 20.25 HRC.

3.1.1.2. Resultado de los ensayos de adherencia

En la Tabla 3.3., se detalla los resultados de los ensayos de adherencia realizados a las probetas que se elaboraron bajo la norma ASTM C633, incluyendo la probeta que se utilizó como testigo para la resistencia a la tracción de la resina EP15 master bond.

Tabla 3.3. Resultados de los ensayos de adherencia.

PROBETAS	IMAGEN		Resistencia a la tracción (PSI)
	A	**B**	
Par 1			5700
Par 2			6630
Par 3			11900
Par 4			12400
Par 5 (Resina)			12790

(Fuente: Propia)

En el Anexo XI se encuentra el respaldo de los resultados del ensayo de adherencia y las gráficas de esfuerzo vs deformación de los ensayos de adherencia realizados en la máquina universal de ensayos mecánicos. En la Figura 3.4., se puede observar los valores de adherencia para cada una de las probetas ensayadas.

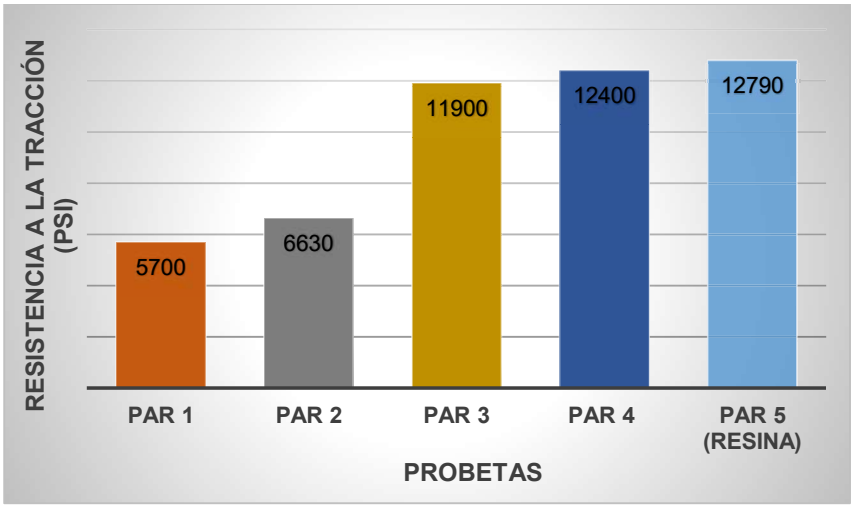


Figura 3.4. Gráfico de barras de la resistencia de tracción en cada probeta

(Fuente: Propia)

3.1.2. Resultados de los ensayos metalográficos

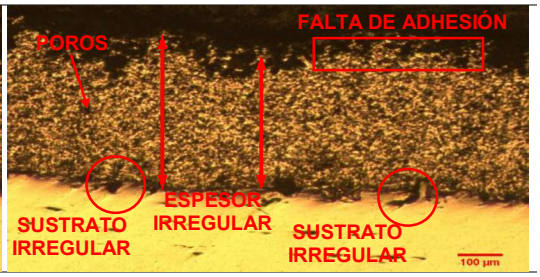
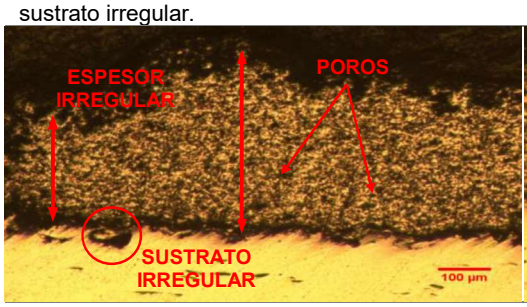
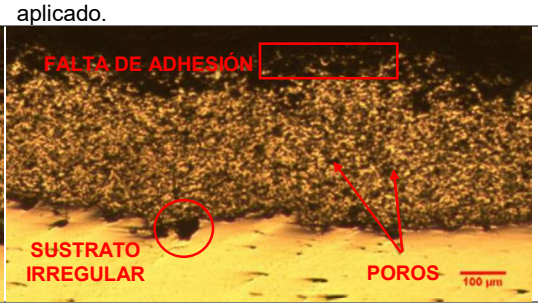
3.1.2.1. Resultado del análisis metalográfico

Los resultados del análisis metalográfico abarcan, imágenes metalográficas de la zona transversal para el análisis de la adherencia entre el sustrato y el recubrimiento, imágenes metalográficas de las muestras que se usaron para los ensayos de dureza de microindentación y mediciones de espesores del recubrimiento de la placa P1 y P2 mediante el software ImageJ. En el Anexo XII se adjunta el respaldo de las imágenes metalográficas realizadas.

3.1.2.2. Resultados del análisis de la adherencia entre el sustrato y el recubrimiento.

Se tiene dos imágenes metalográficas para cada placa metalizada (Ver Tabla 3.4.) en las que se puede observar el fenómeno de adherencia entre el sustrato y el recubrimiento por el proceso de metalizado HVOF.

Tabla 3.4. Imágenes metalográficas de la zona transversal de las placas P1 y P2.

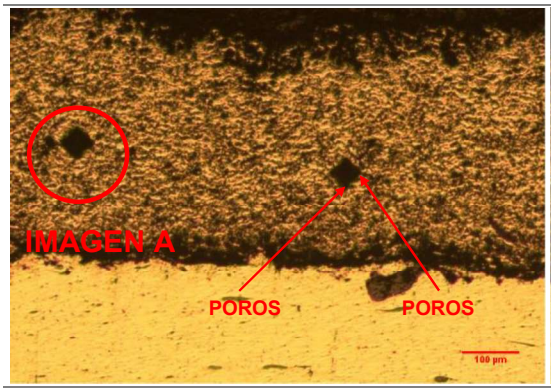
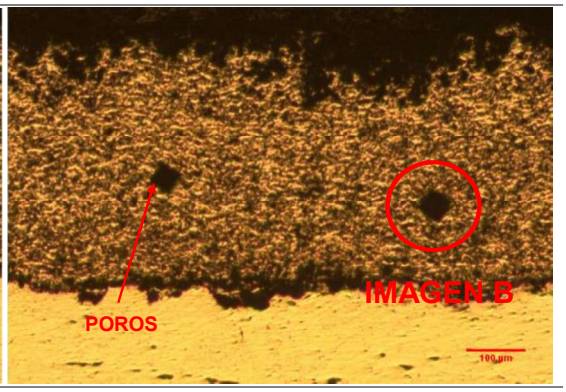
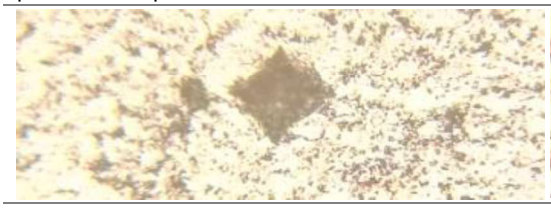
Imágenes metalográficas Sustrato - Recubrimiento	
	
Placa P1 – M1 **100x:** El espesor del recubrimiento no es regular, hay presencia de poros, falta de adhesión en las últimas capas del recubrimiento aplicadas y sustrato irregular.	**Placa P1 – M2** **100x:** Hay presencia de poros, espesor irregular, sustrato irregular en algunos puntos y falta de adhesión en la última capa del recubrimiento aplicado.
	
Placa P2 – M1 **100x:** Un espesor no uniforme, presencia de poros, se tiene un sustrato irregular y hay presencia de poros en el recubrimiento.	**Placa P2 – M2** **100x:** Una falta de adhesión en la última capa metalizada, presencia de sustrato irregular y poros.

(Fuente: Propia)

3.1.2.3. Resultados de las imágenes metalográficas de los ensayos de dureza

En total se hicieron 10 mediciones de microdureza para cada placa metalizada, en las imágenes metalográficas se puede observar dos mediciones de microindentación para cada muestra de las placas metalizadas P1 y P2. (Ver Tabla 3.5.)

Tabla 3.5. Imágenes metalográficas de la microindentación de las placas P1 y P2.

Imágenes metalográficas de la Microindentación	
	
Placa P1 **100x:** La marcas de identaciones no presenta la forma regular del rombo, se debe a una gran presencia de poros en el recubrimiento.	**Placa P2** **100x:** Hay una presencia de poros, al dejar huella la punta del identador, no se visualiza un rombo exacto.
	
Placa P1 **Imagen A**: En la zona ampliada se puede ver que el recubrimiento WC-12Co, tiene una alta presencia de poros.	**Placa P2** **Imagen B:** El recubrimiento carburo de tungsteno (WC-12Co) aplicado sobre la placa P2, presenta un alto porcentaje de porosidad.

(Fuente: Propia)

3.1.3. Resultados de la medición de espesores

En esta parte de los resultados para la medición de espesores se evalúa los espesores de los recubrimientos en las placas P1, P2 y en las probetas para los ensayos de adherencia que se metalizaron.

3.1.3.1. Resultado de mediciones de espesores con el software ImageJ

Con la ayuda de las herramientas que posee el software ImageJ y las imágenes metalográficas hechas a la zona transversal entre el sustrato y el recubrimiento, se pudo obtener mediciones de los espesores del recubrimiento más aproximadas que cualquier otra herramienta de medición de espesores, se puede observar en la Figura 3.5., la captura de pantalla de cómo se realiza las mediciones de espesores con el software ImageJ.

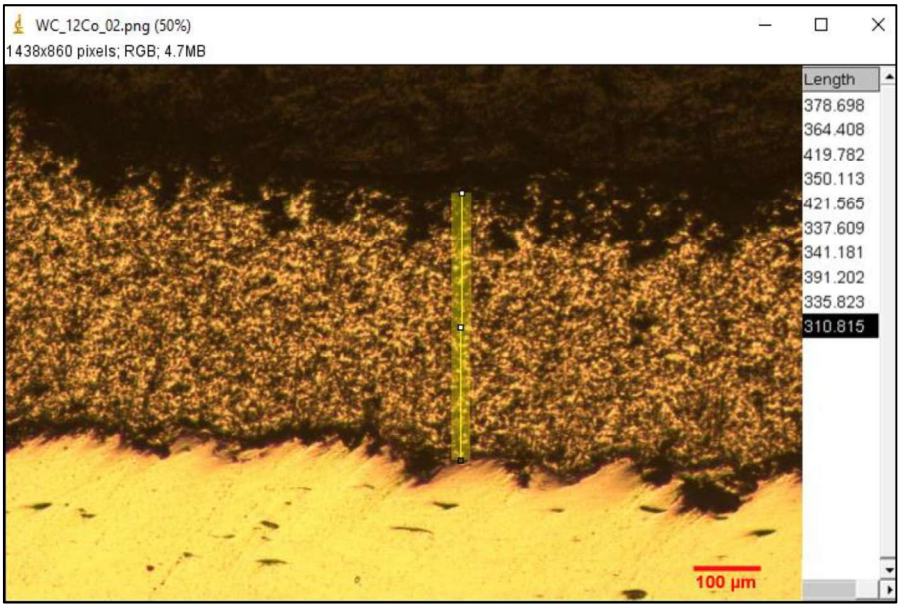


Figura 3.5. Medición de espesores con el Software ImageJ.
(Fuente: Propia)

Se hicieron 5 imágenes metalográficas para cada muestra, por ejemplo 5 imágenes metalográficas para Placa P1 – M1, de cada imagen metalográfica se realizaron 10 mediciones de los espesores del recubrimiento. Así se sacó un promedio por zonas de cada muestra. Los resultados de las mediciones de espesores del recubrimiento en las imágenes metalográficas para la placa P1 se muestra en la Tabla 3.6., y la Tabla 3.7. Mientras los resultados para la placa P2 se muestran en la Tabla 3.8., y la Tabla 3.9.

- **Resultados de espesores del recubrimiento para la placa P1**

Tabla 3.6. Resultados de espesores de la muestra M1 – Placa P1.

MUESTRA 1					
Espesor del recubrimiento (micras)					
Medición	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4	Imagen 5
1	448,37	385,84	378,69	359,06	396,57
2	428,71	367,98	364,40	375,12	359,06
3	339,43	330,46	419,78	409,06	310,86
4	350,11	380,48	350,11	417,99	414,45
5	314,38	370,54	421,56	382,27	384,06
6	387,62	392,98	337,60	332,27	369,77
7	401,91	455,50	341,18	398,34	373,35
8	351,90	452,02	391,20	428,71	428,76
9	346,54	369,76	335,82	375,12	430,51
10	419,78	360,83	310,81	373,33	369,83
TOTAL					
	3788,75	3866,39	3651,15	3851,27	3837,22
ESPESOR PROMEDIO					
	378,88	386,64	365,12	385,13	383,72

(Fuente: Propia)

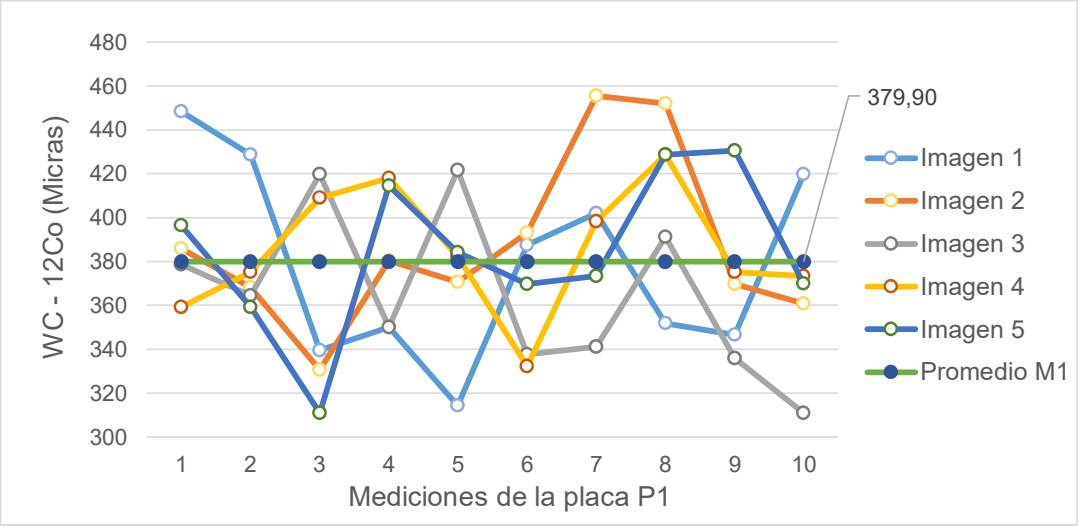


Figura 3.6. Gráfica de espesores de la muestra M1 – P1.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Resultados de espesores de la muestra M2 – Placa P1.

MUESTRA 2					
Espesor del recubrimiento (micras)					
Medición	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4	Imagen 5
1	339,39	403,7	301,88	257,25	405,48
2	335,82	387,64	323,31	323,36	403,71
3	339,4	371,54	366,19	344,75	391,2
4	287,59	367,98	407,27	371,54	392,98
5	350,11	401,91	394,77	335,82	392,98
6	362,61	366,19	373,33	359,06	375,13
7	396,55	403,71	360,83	382,27	359,04
8	380,48	387,62	339,41	419,77	344,75
9	323,32	423,36	389,42	394,77	366,19
10	335,82	405,49	378,69	389,42	380,49
TOTAL					
	3451,09	3919,14	3635,1	3578,01	3811,95
ESPESOR PROMEDIO					
	345,11	391,91	363,51	357,80	381,20

(Fuente: Propia)

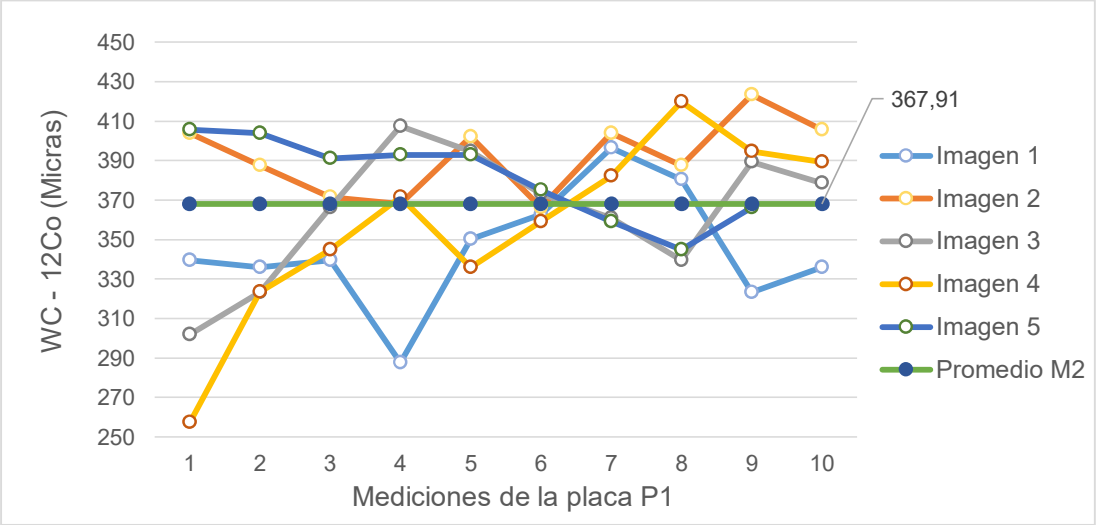


Figura 3.7. Gráfica de espesores de la muestra M2 – P1.

(Fuente: Propia)

- **Resultados de espesores del recubrimiento para la placa P2**

Tabla 3.8. Resultados de espesores de la muestra M1 – Placa P2.

MUESTRA 1					
Espesor del recubrimiento (micras)					
Medición	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4	Imagen 5
1	525,17	425,15	510,9	485,88	543,05
2	485,88	435,85	523,38	482,31	510,95
3	434,07	500,16	510,88	464,46	435,91
4	410,85	523,38	496,6	482,35	439,55
5	443,01	494,8	509,09	473,45	446,6
6	507,31	494,85	475,16	453,89	494,81
7	526,95	469,84	451,16	505,53	519,81
8	491,28	417,99	451,93	528,74	523,39
9	417,99	469,82	484,11	548,43	544,84
10	523,43	475,15	464,43	521,59	503,81
TOTAL					
	4765,94	4706,99	4877,64	4946,63	4962,72
ESPESOR PROMEDIO					
	476,59	470,70	487,76	494,66	496,27

(Fuente: Propia)

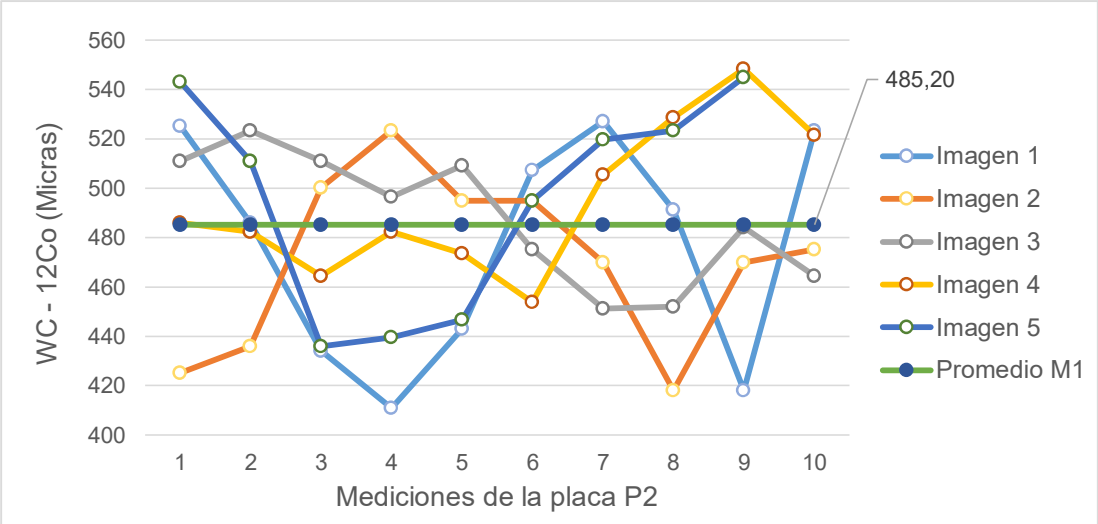


Figura 3.8. Gráfica de espesores de la muestra M1 – P2.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9. Resultados de espesores de la muestra M2 – Placa P2.

MUESTRA 2					
Espesor del recubrimiento (micras)					
Medición	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4	Imagen 5
1	555,58	464,55	460,94	500,16	541,27
2	532,31	457,29	498,40	464,49	451,98
3	514,45	500,16	493,06	435,49	568,04
4	526,95	510,9	444,78	450,15	566,25
5	453,72	443,00	439,48	439,46	548,39
6	419,78	375,12	457,29	455,5	528,74
7	448,36	391,20	514,45	487,66	568,05
8	471,61	507,31	466,27	484,11	512,67
9	526,95	462,64	455,5	439,44	546,61
10	503,73	432,28	478,72	446,60	553,77
TOTAL					
	4953,44	4544,45	4708,89	4603,06	5385,77
ESPESOR PROMEDIO					
	495,34	454,45	470,89	460,31	538,58

(Fuente: Propia)

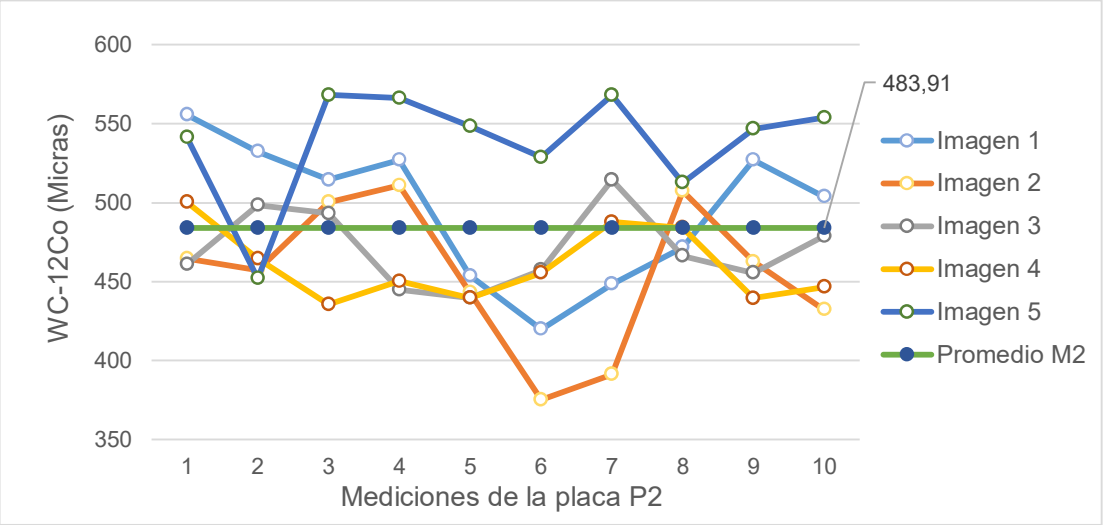


Figura 3.9. Gráfica de espesores de la muestra M2 – P2.

(Fuente: Propia)

3.1.3.2. Resultado de las mediciones de espesores en la placa P1 y P2

Las mediciones obtenidas con el tornillo micrométrico, se las obtuvo en las placas antes que se metalizarán y después, la diferencia de los dos valores dan como resultado el espesor del recubrimiento. Se hizo una toma de 5 mediciones de cada placa, en zonas aleatorias, las mediciones se observa en la Tabla 3.10. Todos los resultados de los datos medidos se los tiene en el Anexo XIII.

Para la obtención del espesor del recubrimiento se realizó una medición inicial del espesor de las placas con el tornillo micrométrico y una medición final después de aplicar el metalizado, así con las diferencias de la medición final y la inicial se tiene el espesor del recubrimiento en las placas metalizadas.

Tabla 3.10. Espesores del recubrimiento de la placa P1 y P2 (Tornillo micrométrico).

Tornillo micrométrico			
Placas	Espesor final (mm)	Espesor inicial (mm)	Espesor del recubrimiento (mm)
P1	4,748	4,336	0,412
P2	4,824	4,332	0,492

(Fuente: Propia)

Los resultados de las mediciones realizadas con el medidor de espesor portátil se detalla en la Tabla 3.11., los datos son del promedio de 5 mediciones para cada placa y se adjuntan en el Anexo XIII.

Tabla 3.11. Espesores del recubrimiento de la placa P1 y P2 (Medidor portátil).

Medidor de espesor portátil	
Placas	Espesor del recubrimiento (mm)
P1	0,402
P2	0,488

(Fuente: Propia)

3.1.3.3. Resultado de las mediciones de espesores en las probetas de adherencia

Se utilizó el tornillo micrométrico para realizar mediciones en la longitud de la probeta, ya que al metalizar la cara plana de la probeta cilíndrica, esta medición va variar, dando como resultado el espesor del recubrimiento. De igual forma que las placas metalizadas, se hizo 5 mediciones antes y después del metalizado en zonas aleatorias. Las mediciones en su totalidad se encuentran en el Anexo XIV y los promedios de los espesores están en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Espesores del recubrimiento tomadas con el tornillo micrométrico.

Tornillo micrométrico				
Probetas		Medición Final (mm)	Medición Inicial (mm)	Espesor del recubrimiento (mm)
1	A	38,34	37,95	0,394
2	A	38,42	38,09	0,324
3	A	38,44	38,07	0,366
4	A	38,34	37,96	0,382

(Fuente: Propia)

Los resultados obtenidos con el medidor portátil se encuentran detallados en la Tabla 3.13., se hizo una toma de 5 mediciones del espesor del recubrimiento en zonas aleatorias para cada probeta metalizada.

Tabla 3.13. Espesores del recubrimiento tomadas con el medidor portátil.

Medidor de espesor portátil							
Probetas		Mediciones (mm)					Espesor del recubrimiento (mm)
1	A	0,396	0,394	0,391	0,388	0,364	0,387
2	A	0,368	0,370	0,381	0,365	0,382	0,373
3	A	0,356	0,371	0,364	0,355	0,360	0,361
4	A	0,361	0,384	0,367	0,372	0,384	0,374

(Fuente: Propia)

3.1.3.4. Resumen de los resultados de mediciones de espesores

En la Tabla 3.14., y la Tabla 3.15., se detalla el resumen de los resultados de las mediciones de espesores del recubrimiento WC – 12Co aplicados en las probetas para los ensayos de adherencia y en placas (P1 y P2), con los diferentes métodos utilizados.

Tabla 3.14. Comparación de los resultados de espesores de las probetas para ensayos de adherencia

Probeta	Tornillo micrométrico (mm)	Medidor portátil (mm)
1 A	0.394	0.387
2 A	0.324	0.373
3 A	0.366	0.361
4 A	0.382	0.374

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Comparación de los resultados de espesores para las placas P1 y P2

Placa	Análisis metalográfico (mm)	Tornillo micrométrico (mm)	Medidor portátil (mm)
P1	M1: 0.3799 M2: 0.3679	0.412	0.402
P2	M1: 0.4852 M2: 0.4839	0.492	0.488

(Fuente: Propia)

Tomando como referencia en la probeta 1A, se tiene un espesor medido con el tornillo micrométrico de 0.394 mm, mientras que el espesor tomado con el medidor portátil de la misma probeta 1A tiene un valor de 0.387 mm, hay una diferencia de 0.007 mm.

Los resultados que fueron medidos con cada instrumento no son muy distintos entre sí, ya que las mediciones varían de acuerdo a la ubicación del instrumento.

3.2. Discusión

3.2.1. Discusión de resultados de los ensayos mecánicos

3.2.1.1. Ensayo de dureza de microindentación

De los datos mostrados en la Tabla 3.1., y la Tabla 3.2, se hace la siguiente discusión:

- El valor más alto obtenido en el ensayo de dureza de microindentación del recubrimiento WC – 12Co fue medido en la placa metalizada P2, dando una microdureza de 65 HRC en el recubrimiento, valor de microdureza que no cumple con el valor nominal del fabricante del WC – 12Co, que tiene un valor de 73 HRC.
- El valor de microdureza promedio del recubrimiento WC – 12Co proyectado en la placa P1 y P2, son de 40.5 HRC y 47.9 HRC respectivamente. Valores de microdureza que cumplen con aumentar la dureza en el eje de acero inoxidable 416, cuyo valor de microdureza promedio es de 20.25 HRC. Esta condición se explica indicando que la aplicación de recubrimientos de carburos de tungsteno WC – 12Co utilizados en instalaciones que requieren alta dureza para evitar un desgaste agresivo, es una tecnología de alta precisión que pocas empresas en el mundo disponen. Por esta razón, la propia empresa IMETCA busca mejorar niveles de calidad. Sin embargo en el presente proyecto se logró al menos duplicar la dureza original del eje que es un logro notorio.
- Los valores de microdureza de las placas metalizadas P1 y P2, dán como resultados valores inferiores al valor nominal del que entrega el fabricante del carburo de tungsteno, según se puede observar en las Figura 3.2. y Figura 3.3, lo que se debe a una gran cantidad de porosidad en el recubrimiento, ya que el indentador de diamante al penetrar deja una huella irregular y agujeros que son poros en el recubrimiento atrapado.
- El tener una dispersión en los resultados mostrados en la Figura 3.2. y Figura 3.3. indica cómo afecta no tener condiciones ambientales controladas durante la realización del proceso de metalizado.

3.2.1.2. Ensayo de adherencia

Los resultados de los ensayos de adherencia se muestran en la Tabla 3.3., y de los valores obtenidos se realiza la siguiente discusión:

- El fabricante del WC – 12Co (Ver Anexo I) indica que tiene una resistencia a la tracción mayor de 10000 psi. Como resina para la aplicación del ensayo de adherencia se utilizó la EP15 master bond (Ver Anexo IX) con una resistencia a la tracción de 12000 psi a 14000 psi.
- La probeta Par 5 que se usó como testigo para la resina EP15 master bond, dán como resultado del ensayo de adherencia un valor de 12790 psi (Resistencia a la tracción), valor que entra dentro de las especificaciones del fabricante.
- Las probetas Par 3 y Par 4 como se puede observar en la imagen correspondiente en la Tabla 3.3. sobrepasaron el valor nominal del esfuerzo a la adherencia que entrega el fabricante del WC – 12Co, para el Par 3 de 11900 psi y para el Par 4 de 12400 psi.
- Las probetas Par 1 y Par 2 dieron como resultado 5700 psi y 6630 psi correspondientemente. Estas probetas no cumplen el valor nominal del esfuerzo de adherencia que entrega el fabricante del WC – 12Co.
- Las probetas Par 1, Par 2 y Par 3, presentaron un patrón similar en el desprendimiento del recubrimiento, ubicando el desprendimiento en los filos de las superficies metalizadas. Esto es causa del operador, como la superficie a metalizar es circular, solo ubica y concentra el chorro de las partículas proyectadas en el centro de la superficie. Por esta razón se debe utilizar pistolas con mayor diámetro de proyección que cubran toda el área. También se debe a que el operador no hace una aplicación uniforme que se resuelve con la automatización del proceso.
- Como ya se mencionó la probeta Par 4 cumple y sobrepasa el valor nominal del fabricante del carburo de tungsteno, este Par 4 no presentó un desprendimiento del recubrimiento. Por motivos que la resina falló antes que hubiera un desprendimiento del recubrimiento.
- La limpieza, el granallado y control de un perfil de anclaje influye en el esfuerzo de adhesión del recubrimiento del WC – 12Co con el sustrato. Con el correcto control de los parámetros en el proceso, pueden dar valores mayores o igual al que entrega el fabricante del carburo de tungsteno.

3.2.2. Discusión de resultados de los ensayos metalográficos

3.2.2.1. Análisis metalográfico

De la Tabla 3.4., observando las imágenes metalográficas realizadas a las placas metalizadas P1 y P2, imágenes con un aumento a 100x, se entrega la siguiente discusión:

- En las muestras de las placas P1 y P2 se tiene presencia de poros, como resultado influye en la dureza del recubrimiento, valores por debajo del que entrega el fabricante del WC – 12Co. Esta presencia de porosidad se debe a la calidad del aire usado en el proceso de metalizado, ya que proviene de un compresor que rara vez en la empresa se le ha hecho un mantenimiento.
- Los compresores con falta de mantenimiento tienen a entregar partículas de aceite y residuos de agua debido a la condensación del aire. Siendo causante del alto contenido de porosidad en el recubrimiento.
- Las imágenes metalográficas de las dos placas P1 y P2, muestran una irregularidad en el espesor del recubrimiento, esta eventualidad se debe a la falta de control de la aportación del WC – 12Co al sustrato, factor que liga al operador y parámetros del equipo TeroJet AC.
- Las últimas capas del recubrimiento presentan una falta de adhesión, causadas por la variación de la distancia de metalizado, partículas que al salir de la pistola se solidifican antes de llegar a la capa del recubrimiento siguiente.
- Como factores de humedad en el aire del ambiente y el aire circulante por el sistema del equipo de metalizado, contaminan con impurezas las partículas proyectadas, aumentando la tasa de porosidad en el recubrimiento.
- De la Tabla 3.5. en las imágenes metalográficas de la microindentación, se puede analizar que la forma irregular que presenta la huella del indentador se debe a la concentración de poros en el recubrimiento.

3.2.3. Discusión de resultados para la medición del espesor del recubrimiento

- Las mediciones realizadas con el software ImageJ de las muestras de las dos placas metalizadas P1 y P2, indican puntos de dispersión la cual muestra la que la irregularidad de espesores mostrados en las imágenes metalográficas es aceptable.
- La comparación del espesor resultante de cada placa metalizada con los pases realizados sobre el sustrato, no se ajusta al parámetro de aportación que el equipo TeroJet Ac entrega, esto quiere decir que el equipo no entrega 5 lb/h, sino una aportación menor.
- Calculando el espesor con todos los pases realizados, la superficie que se metalizo y el tiempo empleado, el equipo entrega una tasa de aportación de 0.85 gr/s y no los 1.89 gr/s (5lb/h) que indica el fabricante del equipo (Ver Anexo VI).

- Handbook of Thermal Spray Technology indica que la aportación de un equipo de HVOF debe ser de 30 pases para obtener un recubrimiento de 0.38 mm en 10 segundos. Como se ve en el Anexo VII en la sección de parámetros de recubrimiento, el número de pases realizados son muy excesivos en comparación con los propuestos por Handbook of Thermal Spray Technology.
- Para la medición del espesor del recubrimiento WC – 12Co, los instrumentos entregan valores sin mucha diferencia entre ellos, pero para la aplicación del proceso HVOF va ser más útil el medidor portátil, por su bajo error en superficies de trabajo que tienen temperaturas altas que da el proceso.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En el presente proyecto de investigación se lograron cumplir con los objetivos específicos y el objetivo general planteado en el proyecto de titulación como son el de estudiar y caracterizar el proceso de metalización por HVOF de un eje de acero inoxidable de una bomba centrífuga, aplicar el método HVOF para elaborar probetas metalizadas, el de medir las propiedades macro y micrográficos para la estructura metalizada y analizar la metodología de aplicación del recubrimiento mediante el proceso HVOF.
- La aplicación de la metalización provocó un cambio significativo en la microestructura del acero inoxidable 416, de acuerdo con la dureza nominal ≈ 26 HRC que indica la norma ASTM A582 para los ejes de acero inoxidables 416; realizando los ensayos de dureza de microindentación en el eje después de la aplicación del proceso HVOF se mantiene en los 20.25 HRC.
- El tener un perfil de anclaje de 172 micras en la preparación del sustrato, perfil de anclaje mayor al que recomienda la granulometría que se especifica en la sección (SSPC-SP COM, 2004), que indica un valor en un rango de (75 – 100) micras, dió como resultado la aceptación de dos pares de probetas de las cuatro que se metalizaron, estas probetas cumplen con los requerimientos del fabricante del WC – 12Co en lo que respecta al esfuerzo de adherencia. Probeta Par 3 y Par 4 con valores de 11900 psi y 12400 psi respectivamente.
- Las imágenes metalográficas que se muestran en la Tabla 3.4. indica una irregularidad en la superficie del sustrato, al tener un perfil de anclaje mayor al que

se recomienda, se produce por reutilizar algunas veces la granalla y contener partículas extrañas.

- En las pruebas de microdureza, valores mostrados en las Figura 3.2. y Figura 3.3., la microdureza para el recubrimiento de las placas P1 y P2 es de 40.5 HRC y 47.9 HRC respectivamente, cumple con el aumentar la dureza al eje de acero inoxidable 416 cuya dureza medida es de 20.25 HRC, pero el procedimiento del proceso HVOF no cumple con las especificaciones del WC – 12Co que señala un valor nominal de 73 HRC según el fabricante.
- La tasa de aportación real del equipo TeroJet Ac no cumple según la establecida por el fabricante (Ver Anexo VI), cuya tasa de aportación real que entrega el equipo es de 0.85 gr/s. esto hace el equipo tenga un rendimiento menor del 50% y se aumentaran a 82 pases para lograr tener un espesor 0.375 mm en el recubrimiento para las probetas, con 268 pases para obtener un espesor 0.429 mm en el recubrimiento de las placas.
- El proceso HVOF al considerar los parámetros de precalentamiento al sustrato se evitó esfuerzos residuales, los cuales influyen directamente en la adherencia de la primera capa aplicada de recubrimiento WC – 12Co.
- A partir de los valores obtenidos de los ensayos de dureza de microindentación y las imágenes metalográficas de las microdureza, mediciones menores al valor nominal establecido por el fabricante del WC – 12Co y la forma irregular del rombo en la huella del indentador, cuya forma es irregular, es el resultados de poros atrapados por el recubrimiento, dando como resultado una gran cantidad de porosidad en el recubrimiento. Estos defectos se dan por no tener las condiciones ambientales controladas de temperatura y humedad en el aire.
- Realizar el proceso HVOF tiene costos elevados pero justifica su uso por todas las ventajas que presenta y aplicaciones ya descritas en la teoría, no solo recupera la parte desgastada o en mal estado, sino que alarga la vida útil.
- El proceso de metalizado HVOF, es un proceso que brinda grandes aplicaciones en la industria pero al ser una tecnología nueva en el país involucra a altos costos en los equipos, en el uso de los recubrimientos y en la investigación del proceso.
- El proyecto de investigación le muestra a la empresa IMETCA que se debe llevar un control de calidad en los equipos, seguir el procedimiento paso a paso para el proceso y que no cuenta con la tecnología adecuada para llegar a los niveles que demanda el proceso HVOF, según la empresa IMETCA visualiza llegar a esa tecnología en 10 años.

4.2. Recomendaciones

- Para elaborar las probetas que se emplean en los ensayos de adherencia se debe tomar en cuenta la calidad de construcción, la tolerancia geométrica, etc., para cada juego de probetas según lo indica la norma ASTM C633.
- Considerar el perfil de anclaje de acuerdo a la malla del material abrasivo a utilizar, en este caso si se utiliza una malla 16 de óxido de aluminio, el perfil de anclaje será un valor en el rango de (70 – 100) micras.
- Para mejorar el esfuerzo de adherencia entre el sustrato y el recubrimiento WC – 12Co, se debe hacer un precalentamiento como lo mencionamos en la metodología experimental para evitar los esfuerzos residuales después de la preparación del sustrato.
- Controlar que el operar cumpla con el procedimiento del precalentamiento, los parámetros de movimiento descritos en la metodología, ya que la distancia de metalizado, la tasa de aportación del polvo y la velocidad de avance son parámetros fundamentales en el proceso, por lo cual se recomienda automatizar con un brazo robótico y contar con un equipo de metalizado en correcto funcionamiento.
- Antes de elegir el proceso de metalización HVOF como método para recuperar el elemento, se debe hacer un análisis de que tan importante es su funcionalidad, sus condiciones de operación, disponibilidad en el mercado nacional, vida útil, la superficie a metalizar y costos.
- Ya que el proceso de metalizado HVOF es una tecnología nueva en el país, se debe realizar más investigaciones en este campo. Buscar los métodos para mejorar el proceso en una cabina que controle las condiciones ambientales, tales como humedad, polvo, partículas extrañas, etc. Aparte se debe tener una inversión económica bien alta.

Referencias Bibliográficas

[1] ANSI B46.1. (1978). SURFACE TEXTURE (SURFACE ROUGHNESS, WAVINESS, AND LAY). (A. S. Engineers, Ed.) New York, USA.

[2] ANSI B46.1. (2009). SURFACE TEXTURE (SURFACE ROUGHNESS, WAVINESS, AND LAY). (A. S. Engineers, Ed.) New York, USA.

[3] Arias Caceres, L. E. (2008). Aplicaciones de Sellos Mecánicos en Bombas de la Industria Petrolera Ecuatoriana.(Tesis). Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador.

[4] ASTM A582-12. (2017). Standard Specification for Free-Machining Stainless Steel Bars.

[5] ASTM C633. (2013). ASTM C633: Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. USA: ASTM Int´l.

[6] ASTM E384 - 17. (2017). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. USA. Recuperado el 2018

[7] ASTM E407-07. (2015). Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. USA.

[8] Atlas Steels Technical Departament. (2013). Stainless Steel Grade DAtasheets. Australia. Obtenido de www.atlassteels.com.au

[9] AWS C2.16/C2.16M. (2017). Guide for Thermal Spray Operator Qualification. (A. W. Society, Ed.)

[10] AWS C2.21/C2.21M. (2015). Specification for Thermal Spray Equipment Acceptance Inspection. (A. W. Society, Ed.)

[11] Bhatia, A. (1999). Thermal Spraying Technology and Applications. USA.

[12] Bhushan, B. (2001). Modern tribology Handbook (Vol. 1). Florida.

[13] Browning , J., Matus, R., & Richter, H. (1995). A new HVOF thermal spray concept, in Thermal Spraying Current Status and Future Trends. Osaka, Japan: A. Ohmori.

[14] CENDI. (2002). Acero Inoxidable. (C. N. Inoxidable, Ed.) San Luis Potosí, Mexico. Obtenido de http://www.iminox.org.mx/downloads/publicaciones/manual_caracteristicas_y_clasificacion.pdf

[15] Cevallos Guerrero, M., & Cisneros Martínez, M. V. (2013). Estudio de Soldabilidad de Aceros Inoxidables y Aceros al Carbon mediante el proceso GTAW sin material de aporte. (Tesis). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

[16] Colmenares A, J. R. (2004). Optimización de Recubrimientos Metálicos Nanoestructurales depositados por Rociado Térmico. (Tesis de pregrado). Caracas - Venezuela, Universidad Central de Venezuela. Obtenido de http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/7227/1/Colmenares_Pregrado_UCV_ingMec.pdf

[17] Cubillos Ríos, L. C., & Mera Aguilar, J. A. (2012). DESARROLLO DE ESTÁNDARES DE CALIDAD EN PRODUCCIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR TERMOROCIADO DE ARCO ELÉCTRICO Y HVOF EN LA EMPRESA IMETCA (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

[18] CYM. (2015). Preparación de Superficie - Norma SSPC. Santa Fé, Argentina. Obtenido de https://cym.com.ar/intranet/Preparacion-de-superficies-norma-SSPC-granallado-cymmateriales-shotblasting.pdf

[19] Dvorak, M., & Torday, R. (1996). HVOF coatings produced at increased combustion chamber pressures, in Thermische Spritzkonferenz TS96, (Vol. 175). Düsseldorf, Germany.

[20] ELFUSA. (2018). ELFUSA GERAL DE ELECTROFUSAO LTDA. Recuperado el Enero de 2018, de http://www.elfusa.com.br/pt/produtos/abrasivos/alomixm

[21] Espejo Mora, E., & Martinez, J. (Septiembre de 2011). Modos de falla comunes en ejes. (E. E. Mora, Editor) Recuperado el 2018, de Análisis de Fallas de Elementos Mecánicos: https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaeespejo/classroom-news/modosdefallatipicosenejes

[22] FEPA 44 - 1. (2006). Estándar para los granos abrasivos de óxido de aluminio fundido y carburo de silicio. Recuperado el 2018, de http://dshqi.com/en/news/fepa-ansi-abrasive-grains-standards-list/index.html

[23] Galindo, E. (2011). ESTADÍSTICA. Métodos y Aplicaciones. PROCIENCIA EDITORES.

[24] Gómez Angarita, R. M. (2009). Estudio del comportamiento al desgaste erosivo de recubrimientos WC-Co Micro y Nano estructuras.(Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, España. Obtenido de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14354/7.%20TESIS%20MASTER%20DIMM.pdf?sequence=1

[25] González López, D. (11 de Noviembre de 2010). Recubrimientos superficiales mediante Proyección Térmica. Gijón, España. Recuperado el 2018, de SCRIBD: https://es.scribd.com/document/190316823/2010proyeccion-3-Recubrimientos-Superficiales-Por-Proyecc-Termica

[26] Handbook, A. (2004). Thermal Spray Technology (Vol. 9). (J. R. Davis, Ed.) USA: Materials Park, Ohio: ASM International, 2004.

[27] Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). Coatings Tribology. Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering (2da ed., Vol. 56). United Kingdown: ELSEVIER. Obtenido de http://users.encs.concordia.ca/~tmg/images/6/64/Coatings_Tribology.pdf

[28] Ibrahim, A., & Sampath, S. (1996). Effect of grinding mechanisms on surface finish and hardness of thermally sprayed WC - Co, in Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C. Berndt (Ed.). ASM International, Materials Park, OH, USA.

[29] IMINOX. (2012). Conozca el inoxidable, del ABC del inoxiddable. San Luis Potosí, México: Láser Print, S.A. Obtenido de http://www.iminox.org.mx/downloads/abc_inoxidable/libro_a/abc_libro-a.pdf

[30] INDURA. (2010). Manual Aceros Inoxidables. Cerrillos, Chile. Obtenido de www.indura.net

[31] Istrati, G. (1961). Manual de los Aceros Inoxidables. Argentina: Alsina.

[32] Itzel Deynny, M. G., & Ramírez Pérez, D. (2010). Caracterización del proceso de rociado térmico de acero inoxidable sobre aceros de bajo contenido de carbono. CD, Mexico.

[33] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). Manufactura, Ingeniería y Tecnología (5ta ed.). México: Pearson Educación.

[34] Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2008). Administración de operaciones. Procesos y cadenas de valor (8va ed.). Mexico: PEARSON Educación.

[35] MESSER Group. (1998). MESSER, gases for life. Obtenido de https://www.messer.es/aeronautica

[36] Morán García, I. D., & Ramírez Pérez, D. (2010). Caracterización del proceso de rociado térmico de acero inoxidable sobre aceros de bajo contenido de carbono.(Tesis). Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.

[37] MSC Corp. (2015). Introducción al rociado térmico o metalizado. Obtenido de http://metal-spray-coating.com/es/wp-content/uploads/2015/03/Thermal_Spray_V4-MSC-Esp.pdf

[38] OERLIKON METCO. (2000). oerlikon metco. Obtenido de https://www.oerlikon.com/metco/en/about-metco/our-businesses/history/

[39] Oña Pazmiño, J. R. (2015). Diseño y Construcción de una Pistola de Termorociado por HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)(Tesis). Quito, Ecuador.

[40] Pawlowski, L. (2008). The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings (2da ed.). Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.

[41] Pawlowski, L., Vardelle, M., & Fauchais, P. (1982). A model of the temperature distribution in an alumina coating during plasma spraying. Thin Solid Films.

[42] Robert C. Tucker, J. (1994). Praxair Surface Technologies, Inc. Surface Engineering (Vol. 5). Thermal Spray ASM Handbook.

[43] Sakaki, K., & Smimizu, Y. (2001). Effect of the increase in the entrance convergent section length of the gun nozzle of HVOF and GGC processes. J. Therm. Spray.

[44] SCHMIDT. (2018). Obtenido de http://www.schmidtabrasiveblasting.com/product.cfm?cid=1&id=30

[45] SHIGLEY, J., & MISCHKE, C. (2002). Diseño de Ingeniería Mecánica. México: McGRAW-HILL.

[46] SISACR. (2003). SOLUCIONES INTEGRALES DE IMPORTACIÓN S.A. Obtenido de http://sisacr.com/content/acero-inoxidable-especial-416

[47] SSPC COM. (2004). SSPC/NACE Standards. USA. Obtenido de http://www.sspcelearning.org/attachments/Library/Fappx.pdf

[48] SSPC-SP COM. (2004). Surface Preparation Specifications, Surface Preparation Commentary for Steel and Cnocrete Substrates. USA. Obtenido de http://www.iso-iran.ir/standards/others/SSPC-SP%20COM-2004.pdf

[49] SULZER. (2015). PROCESO DE METALIZADO. SULZER, 1-5.

[50] Toapanta Chiluisa, T. R. (2017). Caracterización de la soldadura de aceros inoxidables ferríticos mediante metales de aporte asutenítico.(Tesis). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO I. Polvo Carburo de tungsteno HVOF P88-12

MESSER

HVOF P88-12

Características Generales

Es un polvo de carburos de tungsteno – cobalto específicamente diseñado para el sistema HVOF produce unos recubrimientos duros resistentes a la abrasión y corrosión, para operar a temperaturas de servicio de hasta 482°C. Es ideal para usar en una amplia variedad de aplicaciones de alto desgaste incluyendo erosión abrasión y desgastes por fricción.
Se lo utiliza en la industria hidroeléctrica (álabes, ruedas), ventiladores, aparatos en la industria petrolera y en otras industrias donde la erosión, abrasión y fricción son preponderantes.

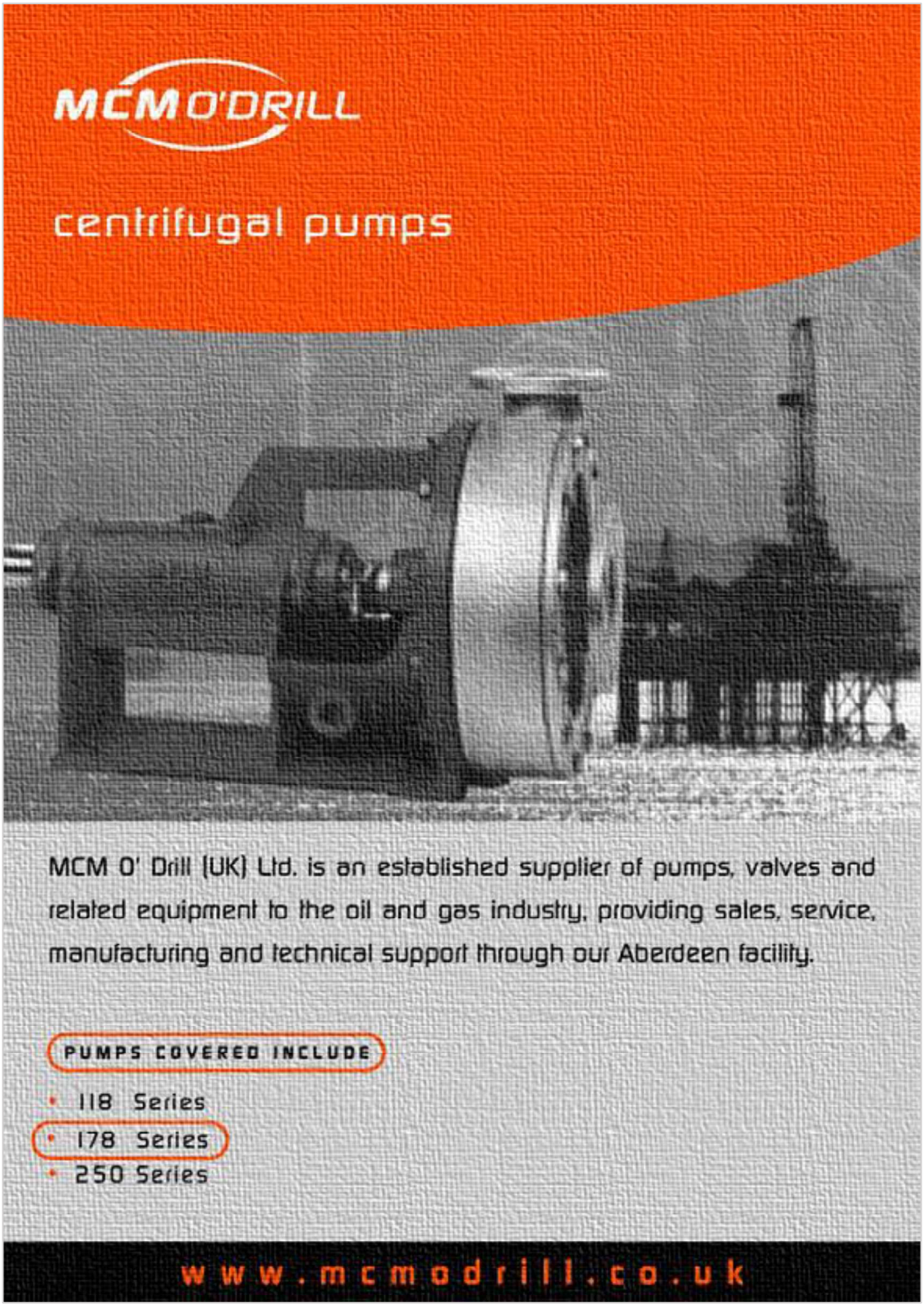
Composición Química Nominal

WC	Co
88	12.0

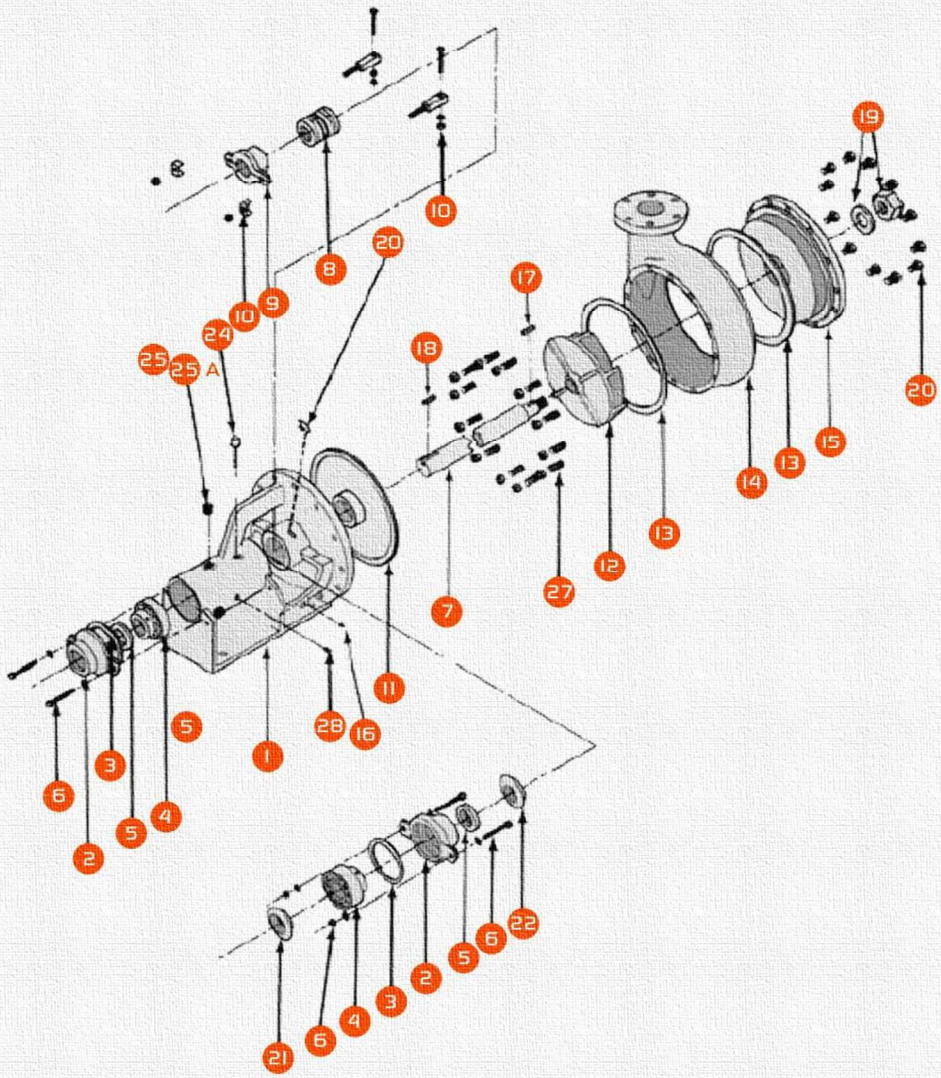
Datos Técnicos

Dureza…….. 73 HRC
Esfuerzo de adherencia……10.000+psi

ANEXO II. Diagrama de partes de la Bomba centrífuga Tipo W, Serie (178)



178 Series
Parts Diagram



www.mcmodrill.co.uk

178 Series Centrifugal Pump Part Number Comparison Chart

Item No	Description	Qty Reg	MCM	Mission	Mattco	Harrisburg
1	178 Pedestal	1	P78PED	L3785	13515	1-178-PED
2	178 Bearing Cap	2	P78BC	3790	13559	2-178-BC
3	178 Bearing Gasket	2	P78BCG	10399-23-1	13563	3-178-BCG
4	178 Bearing Assy	2	P78BA8	3944-3	5091-005	4A-178-BA8
5	178 Oil & Grease Seal	2	P78OGS	5550-002	550-002	5-178-OGS
6	178 Bearing Cap Bolt Assy	4	P78BCBA	3861-1/3932-2	13669	6-178-BCBNA
7	178 316 SS Shaft F/2X3 - 5X6	1	P78SH316SS56	3786-4A	13552-129	7F-178-316SS
	178 416-SS Shaft F 2X3- 5X6	1	P78SH416SS56	4932-21A`	13664-119	7A-178-416SS
	178 Ceramic Coated F/2X3- 5X6	1	P78SH416SC56	17238-21G-7A	13664-112	7B-178-416SSC
	178 316 SS Shaft F/6X8	1	P78SH316SS68	14928-4A	13553-229	7F-178A-316SS
	178 416-SS Shaft F/6X8	1	P78SH416SS68	14928-21A	13553-219	7C-178A-416SS
	178 Ceramic Coated F/6X8	1	P78SH416SC68	17343-21G-7A	13553-212	7D178A416SSC
8	178 Graphite Packing	1	P78PMSG	8264-17W-OBA	13523	8A-178-PMSG
	178 King Packing	1	P78PMSK	8474-17W-1A	13526	8C-178-PMSK
	178 Teflon Packing	1	P78PMST	8264-17W-7A	13527	8D-178-PMST
9	178 Packing Gland	1	P78PG	7406-13A	13547	9-178-GPA
10	178 Gland Adjusting Bolt Assy	2	P78GABA	A3701A	13658	10-178-GABA
11	178 Wear Plate Ductile Iron	1	P78WPD	3779-30	13541-002	11B-178-WPD
12	178 2X3 Ductile RH Impeller	1	P78D23MR xxx	4610-XX-30	13608-XX-112	127823IRXXX
	178 3X4 Ductile RH Impeller	1	P78D34MRxxx	4605-XX-30	13610-XX-112	127834IRXXX
	178 4X5 Ductile RH Impeller	1	P78D45MRxxx	4705-XX-30	13612-XX-112	127845IRXXX
	178 5X6 Ductile RH Impeller	1	P78D56MRxxx	4710-XX-30	13614-XX-112	127856IRXXX
	178 6X8 Ductile RH Impeller	1	P78D68MRxxx	5142-XX-30	13616-XX-112	126868IRXXX
13	178 Housing Gasket	2	P78HG	10399-20-1	13594-001	13A-178-HGF
14	178 2X3 Ductile Housing Only	1	P78D23H	N/A	N/A	147823HD
	178 3X4 Ductile Housing Only	1	P78D34H	N/A	N/A	147834HD
	178 4X5 Ductile Housing Only	1	P78D45H	N/A	N/A	147845HD
	178 5X6 Ductile Housing Only	1	P78D56H	N/A	N/A	147856HD
	178 6X8 Ductile Housing Only	1	P78D68H	N/A	N/A	147868HD
15	178 2X3 Ductile Face	1	P78D23F	N/A	N/A	267823HFD
	178 3X4 Ductile Face	1	P78D34F	N/A	N/A	267834HFD
	178 4X5 Ductile Face	1	P78D45F	N/A	N/A	267845HFD
	178 5X6 Ductile Face	1	P78D56F	N/A	N/A	267856HFD
	178 6X8 Ductile Face	1	P78D68F	N/A	N/A	267868HFD
14/15	178 2X3 Housing Assy RH Duct	1	P78D23HFAR	G4676-30A	13674-002	147823DHAR
	178 3X4 Housing Assy RH Duct	1	P78D34HFAR	F4644-30A	13675-002	147834DHAR
	178 4X5 Housing Assy RH Duct	1	P78D45HFAR	F4732-30A	13676-002	147845DHAR
	178 5X6 Housing Assy RH Duct	1	P78D56HFAR	F4742-30A	13667-002	147856DHAR
	178 6X8 Housing Assy RH Duct	1	P78D68HFAR	F5144-30A	13678-002	147868DHAR
21	Oil Slinger	1	P78SRO	N/A	N/A	19-178-SRO
22	Water Slinger	1	P78SRW	C3787A	13565	20-178-SRW

Note: xx or xxx indicates Impeller Size

www.mcmodrill.co.uk

ANEXO III. Ficha técnica del acero inoxidable 416

Atlas Steels

Grade Data Sheet

416

Grade 416 has the highest machinability of any stainless steel, at about 85% of that of a free-machining carbon steel. As for most other free-machining steels the improvement in machinability is achieved by addition of sulphur which forms manganese sulphide inclusions; this sulphur addition also lowers the corrosion resistance, weldability and formability to below that of its non-free machining equivalent Grade 410.

Grade 416 is sometimes used in the unhardened or hardened and highly tempered condition because of its low cost and ready machinability.

Martensitic stainless steels are optimised for high hardness, and other properties are to some degree compromised. Fabrication must be by methods that allow for poor weldability and usually also allow for a final harden and temper heat treatment. Corrosion resistance is lower than the common austenitic grades, and their useful operating temperature range is limited by their loss of ductility at sub-zero temperatures and loss of strength by over-tempering at elevated temperatures.

Corrosion Resistance

Grade 416 has useful resistance to dry atmospheres, fresh water and mild alkalies and acids, but less resistant than the equivalent non-free-machining grades. Less corrosion resistant than the austenitic grades and also less than 17% chromium ferritic alloys such as Grade 430. High sulphur content free machining grades such as 416 are totally unsuitable for marine or other chloride exposure.

Maximum corrosion resistance is achieved in the hardened condition, with a smooth surface finish.

Consult Atlas Technical Assistance for specific environmental recommendations.

Heat Resistance

Fair resistance to scaling in intermittent service up to 760°C and up to 675°C in continuous service. Not recommended for use in temperatures above the relevant tempering temperature, if maintenance of mechanical properties is important.

Heat Treatment

Full Annealing

Heat to 815-900°C for ½ hour per 25mm of thickness. Cool at 30°C per hour maximum to 600°C and air cool.

Sub-Critical Annealing

Heat to 650-760°C and air cool.

Hardening

Hardened by heating to 925-1010°C, quenching in oil, and tempering to suit the mechanical requirements. See accompanying table.

Note: The tempering range 400-580°C should be avoided, due to poor ductility.

Welding

Grade 416 has poor weldability. If welding is necessary ... use Grade 410 low hydrogen electrodes. Pre-heat to 200-300°C. Follow immediately with annealing or re-hardening, or a stress relief at 650-675°C.

A better option if the weld is not required to be hard is to use a Grade 309 austenitic stainless steel filler rod.

Machining

Grade 416 offers exceptionally good machinability, the highest of any of the commonly available stainless steels. Best machinability is in the sub-critical annealed condition.

Typical Applications

Valve parts, pump shafts, automatic screw machined parts, motor shafts and washing machine components. Bolts, nuts, studs and gears.

Grade Data Sheet

416

Specified Properties

These properties are specified for bar product in ASTM A582/A582M. Similar but not necessarily identical properties are specified for other products such as wire and forgings in their respective specifications.

Composition Specification (%)

Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
416	min.	-	-	-	-	0.15	12.0	-	-	-
	max.	0.15	1.25	1.00	0.06	-	14.0			

Mechanical Properties - typical and specified values

Tempering Temperature (°C)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength 0.2% Proof (MPa)	Elongation (% in 50mm)	Hardness Brinell (HB)	Impact Izod (J)
Annealed *	517	276	30	262 max *	-
Condition T **	-	-	-	248-302 **	-
300	1350	1050	10	410	50
400	1390	1090	12	420	43
500	1400	1100	17	420	15 #
600	870	720	20	280	45
700	710	500	22	210	65

* Annealed Condition A of ASTM A582M - Brinell Hardness is specified maximum, other properties are typical only, and will depend upon exact composition and heat treatment details.

** Hardened and tempered Condition T of ASTM A582M – specified hardness range.

Due to associated low impact resistance this steel should not be tempered in the range 400-580°C

Physical Properties

(typical values in the annealed condition)

Grade	Density (kg/m³)	Elastic Modulus (GPa)	Mean Coefficient of Thermal Expansion			Thermal Conductivity		Specific Heat	Electrical Resistivity
			0-100°C (µm/m/°C)	0-315°C (µm/m/°C)	0-538°C (µm/m/°C)	at 100°C (W/m.K)	at 500°C (W/m.K)	0-100°C (J/kg.K)	(nΩ.m)
416	7700	200	9.9	11.0	11.6	24.9	28.7	460	570

Grade Specification Comparison

Grade	UNS No	Euronorm No	Euronorm Name	Swedish SS	Japanese JIS
416	S41600	1.4005	X12CrS13	2380	SUS416

These comparisons are approximate only. The list is intended as a comparison of functionally similar materials **not** as a schedule of contractual equivalents. If exact equivalents are needed original specifications must be consulted.

Possible Alternative Grades

Grade	Why it might be chosen instead of 416
410	The high machinability of 416 can be sacrificed to gain better corrosion resistance and formability.
303	A slight drop in machinability to gain better availability. Grade 303 is non-hardenable.
182	A free-machining ferritic grade with better "soft magnetic" performance for solenoid shafts. Grade 182 is non-hardenable.

Limitation of Liability

The information contained in this datasheet is not an exhaustive statement of all relevant information. It is a general guide for customers to the products and services available from Atlas Steels and no representation is made or warranty given in relation to this document or the products or processes it describes.

ANEXO IV. Granalla Óxido de aluminio ALOMIX – L

ELFUSA
GERAL DE ELETROFUSÃO LTDA

Rua Júlio Michelazzo, 501 - Vila Nossa Senhora de Fátima
São João da Boa Vista - SP - Brasil CEP: 13.872-900
Telefone: +55 (19) 3634-2300 - www.elfusa.com.br

FP-4160-039 - Versão-02 - Data revisão: 20.04.2018

ALOMIX - L (Macro) >> LIXAS

Óxido de Alumínio Fundido Marrom

ALOMIX é um produto composto basicamente de óxido de alumínio obtido pela fusão redutora de bauxitas de alta qualidade em fornos elétricos a arco e material proveniente do tratamento magnético do óxido de alumínio marrom. Apresenta uma excelente relação entre custo/benefício, sendo recomendado para lixas de combate. Os grãos são classificados em conformidade com as normas ANSI ou FEPA.

Características Gerais

Densidade Específica Real	Friabilidade (ANSI-B74.8R2007)
4,2 g/cm³	59%

Análise Química por FRX (%)

Al_2O_3	TiO_2	SiO_2	Fe_2O_3
85,1	2,5	3,8	7,3

Densidade Bulk (g/cm³)

Grão	(L) angular
12	1,71
16	1,71
20	1,71
24	1,71
30	1,70
36	1,70
40	1,66
50	1,66
60	1,66
80	1,65
100	1,64
120	1,64
150	1,64
180	1,63
220	1,63

FEPA 44 - 1:2006

Os valores acima informados são típicos, para maiores informações contatar o Departamento de Engenharia e Aplicação.
Fone +55 (19) 3634-2366 - e-mail: qualidade@elfusa.com.br

GRUPO CURIMBABA
www.grupocurimbaba.com.br

ANEXO V. Equipo de Granallar 3.5 CF SCHMIDT

www.AxxiomMfg.com
Phone: 800.231.2085
Fax: 888.600.3300

SCHMIDT

- Low profile makes loading of abrasive easy
- Extremely low pressure drop for increased productivity
- 90° angled cone bottom improves abrasive flow
- 150 psi (10.3 bar) rated
- Optional load skid protects valves and piping
- Packages available (see details below)

VBS (Volumetric Blowdown Suppression) System

- Reduces blowdown intensity by diffusing and safely re-directing blowdown exhaust air
- No screen or filters to clog = minimal maintenance
- Easy to replace wear components

* standard only on standard 3.5 and larger Combo/MV2 systems

Package 'A' includes: pneumatic remote controls, ComboValve, MV2, 55' twinline control hose, G2 deadman and moisture separator

Package 'B' includes: "A" **plus** 50' blast hose assembly and long venturi nozzle

Package 'C' includes: "B" **plus** NIOSH approved NOVA respirator and 50' air supply hose kit and airline filter

1.5 cu. ft. vessel with 1" piping - shipping weight: 130 lbs.
3.5 cu. ft. vessel with 1 1/4" piping - shipping weight: 240 lbs.
6.5 cu. ft. vessel with 1 1/2" piping - shipping weight: 316 lbs.

10/11

© 2011 Axxiom Manufacturing, Inc.
Axxiom Manufacturing, Inc. is the manufacturer of Schmidt products. Certain products manufactured by Axxiom are protected by patents and pending applications in the United States and globally. MV2, ComboValve, Thompson, HALOK, Schmidt, the Schmidt stylized "S" and the Axxiom design are registered trademarks. Trademarks pending or allowed include VPI, Microvalve, VBS, Ergo-Ladder, miniBRS, G2E, G2P, CEN and the Axxiom logo. All rights reserved.

AXXIOM MANUFACTURING, INC.

ANEXO VI. TeroJet AC HVOF

TeroJet – AC

The TeroJet Model AC is a new generation High Velocity Oxy Fuel powder spray system designed to apply high quality carbide and metallic coatings. The system is simple in design, efficient in operation, and easy to use and maintain. This combination of features makes the TeroJet AC suitable for both production, machine mount applications, as well as, for hand-held occasional use. The TeroJet has been designed to be as economical as possible for a true HVOF system. Several features make this possible.

First, the torch is air cooled so there is no need for a water pump. Air-cooling simplifies the design of the torch making it less expensive to produce. Second, the torch uses compressed gas as the fuel, typically propane or propylene. Kerosene based systems require an expensive high-pressure pump plus controls to balance the oxygen and kerosene. Lighting is done manually, eliminating the need for an internal ignition system that only adds cost and complexity to the system. The result is a system with a low capitalization cost and a low hourly operating cost.

The TeroJet torch uses a novel air cap design to "choke" the gas flow thereby generating a high gas exit velocity. In its operating mode seven shock diamonds are visible in the combustion gas stream. A high combustion gas exit velocity insures that the coatings produced will be dense and low in porosity, will exhibit a high micro hardness and associated resistance to abrasion and will be well bonded to a properly prepared base material.

The powder and carrier gas enters the torch axially. This feature insures efficient heating and acceleration of the powder coupled with minimal wear of the internal parts of the torch nozzle. The use of a nozzle with air cap as compared to a long barrel typical of kerosene systems minimizes loading of the powder onto the internal parts of the torch. Interrupting the spray process to replace worn or clogged barrels can be costly and time consuming. The design of the TeroJet AC torch virtually eliminates this problem.

Regulated flows of oxygen and fuel gas are delivered to the torch in the correct proportions and a flame is developed. Compressed air restricts the flame, cools the torch and "blasts" the powder particles to produce a fine, high velocity spray. The combination of the nozzle design, air cap design and high pressure compressed air create the supersonic gas stream as evidenced by the visible shock diamonds.

The system includes a highly precise, rotating disc powder feeder that accurately and reliably delivers powder to the torch where it is axially fed into the combustion gas stream. The inclusion of regulators and gas flow meters designed to match the requirements of the torch insure that process parameters are tightly controlled
The system includes a highly precise, rotating disc powder feeder that accurately and reliably delivers powder to the torch where it is axially fed into the combustion gas stream. The inclusion of regulators and gas flow meters designed to match the requirements of the torch in sure that process parameters are tightly controlled

The system is capable of applying tungsten carbide, chromium carbide plus metallic powder blends, metallic and fusible powders. Further, the system can accommodate both –45 + 15µmand –53 + 20µm size powders, the two most common size ranges commercially available. However, the finer, -45 + 15 µm range powder is preferred as it will yield denser coatings. Typical powder spray rates for the TeroJet AC are 5 lb/hr for carbides and up to 8 lb/hr for metallics. The nominal deposit efficiency is 70%

The Model PF 700 powder feeder is the latest in a series of designs specifically tailored for the thermal spray process. The system is capable of delivering a steady, non-pulsating supply of powder to the torch. The PF 700 operates on a volumetric feed principle. At the bottom of the pressurized canister there is a rotating metal disc (slotted wheel) mounted off center with respect to the canister. A given volume of powder fits into each slot and as the disc rotates past the exit port, the powder is fed into the powder hose and then to the torch. The feed rate of the powder (g/min, lb/hr, etc.) is governed by the rpm's of the rotating disc. The disc is driven by a precision control, geared, variable speed AC motor and the rpm is displayed on the LED located on the control console front panel. The actual rpm of the disc equals the LED displayed reading divided by 100.

Powders suitable for use with the TeroJet AC system include the following:

Carbides

55588T	88% WC + 12% Cobalt
55588VF	88% WC + 12% Cobalt (finer particle size)
CPP 2506	83% WC + 17% Cobalt
55575	75% Chromium Carbide + 25% Nickel Chromium alloy

Metals

55116	316 type stainless steel
55125	Nickel alloy 625
55396	Nickel Chromium Boron alloy (use as sprayed or fused)

Eutectic HVOF Systems

TeroJet AC

TeroJet AC III

CJK5

YOUR RESOURCE FOR PROTECTION, REPAIR AND JOINING SOLUTIONS

Castolin Eutectic
Eutectic Castolin

Eutectic Corporation
N94 W14355 Garwin Mace Drive
Menomonee Falls, WI 53051 USA
P 800-558-8524 • F 262-255-5542
www.eutectic.com

Eutectic Services
12300 Carmen Avenue
Milwaukee, WI 53225 USA
P 800-558-8524 • F 262-255-5542

Statement of Liability: Due to variations inherent in specific applications, the technical information contained herein, including any information as to suggested product applications or results, is presented without representation or warranty, expressed or implied. Without limitation, there are no warranties of merchantability or fitness for a particular purpose. Each process and application must be fully evaluated by the user in all respects, including suitability, compliance with applicable law and non-infringement of the rights of others, and Eutectic Corporation and its affiliates shall have no liability in respect thereof.
HVOF 9-15 © 2008, Eutectic Corporation, ®Reg. T.M., Printed in the U.S.A.

ANEXO VII. Hoja de procesos del metalizado

HOJA DE PROCESO DE METALIZADO

INSPECTOR	Yánez Omar	**PROCESO**	HVOF	
LUGAR	Quito	**MATERIAL BASE**	Acero Inoxidable 416	
FECHA	30 de enero 2019	**ELEMENTO**	Probetas ASTM C633	**N°**
EMPRESA	IMETCA			4

DETALLE DEL ELEMENTO:

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Limpieza

Operador: Alexis Chulde
Zonas: 1
Cartas (SSPC): 1, 5
Observaciones:

Preparación del Sustrato

Operador: Alexis Chulde
Enmascaramiento: No es necesario
Equipo: SCHMIDT 3.5 CF
Tipo de abrasivo: Oxido de Aluminio
Tamaño de grano (Malla): 16
Presión: 90 – 120 Psi
Distancia de trabajo: 80 mm
Apertura de boquilla: 11 mm
Ángulo de impacto: 90 grados
Perfil de anclaje: 172 µm
Instrumento de medición: Elcometer Rugosímetro
.
Observaciones:

PRE - METALIZADO

Operador: Diego Cadena
Precalentamiento: Si
Temperatura: 39°C
Tiempo: 10 seg.
Equipo: TeroJet AC
Humedad: No medida

Temperatura en recubrimiento: 83°C
Temperatura del gas: No medida
Distancia: 23 cm
Con enfriamiento: X **Sin enfriamiento:**

PROCESO DE METALIZADO

Equipo: TeroJet AC de Eutectic
Operador: Diego Cadena

Parámetros de los Gases

Gases	C_3H_8	O_2	N_2	Aire
Presión	90 psi	150 psi	75 psi	120 psi
Caudal	50 SCFH	260 SCFH	35 SCFH	-
Consumo	0.069 m³	0.360 m³	0.048 m³	-

Parámetros de Movimiento

Patrón de metalizado: 90°±20°
Distancia pistola-sustrato: 230 mm.
Movimiento relativo p-s: 1.40 mm/seg.
Numero de pases: 82 (individual)
Tiempo entre pases: - **Tiempo Total:** 176 seg.

Parámetros del Recubrimiento

Recubrimiento: WC – 12Co
Espesor del recubrimiento: 0.375 mm.
Velocidad de alimentación: 0.85 gr/seg.
Consumo real de polvo: 150 gr
Estimación del consumo: 332 gr
(1.89 gr/seg ó 5 lb/h)
Observaciones: El consumo es el total entre las probetas y placas metalizadas.

OPERACIONES PORSTERIORES

Operador:
Proceso:
Observaciones: No se hizo ninguna operación posterior, porque fueron probetas para ensayos.

INSPECCIÓN DEL PROCESO

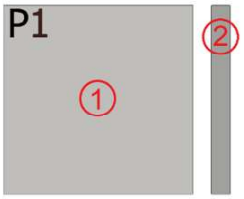
INSPECTOR	EMPRESA
Yanez Montezuma Omar	Ing. Juan Carlos Araujo

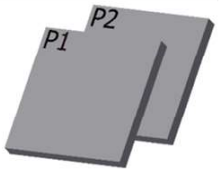
ANEXO VII.1 Hoja de procesos del metalizado

HOJA DE PROCESO DE METALIZADO

INSPECTOR	Yánez Omar	**PROCESO**	HVOF	
LUGAR	Quito	**MATERIAL BASE**	Acero Inoxidable 416	
FECHA	30 de enero 2019	**ELEMENTO**	Probetas para ASTM E407, ASTM E384	**N°**
EMPRESA	IMETCA			2

DETALLE DEL ELEMENTO:





PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Limpieza

Operador: Alexis Chulde
Zonas: 1
Cartas (SSPC): 1, 5
Observaciones:

Preparación del Sustrato

Operador: Alexis Chulde
Enmascaramiento: No es necesario
Equipo: SCHMIDT 3.5 CF
Tipo de abrasivo: Oxido de Aluminio
Tamaño de grano (Malla): 16
Presión: 90 – 120 Psi
Distancia de trabajo: 80 mm
Apertura de boquilla: 11 mm
Ángulo de impacto: 90 grados
Perfil de anclaje: 175 µm
Instrumento de medición: Elcometer Rugosímetro
.
Observaciones:

PRE - METALIZADO

Operador: Diego Cadena
Precalentamiento: Si
Temperatura: 39°C
Tiempo: 10 seg
Equipo: TeroJet AC
Humedad: No medida

Temperatura en recubrimiento: 64°C
Temperatura del gas: No medida
Distancia: 23 cm
Con enfriamiento: X **Sin enfriamiento**:

PROCESO DE METALIZADO

Equipo: TeroJet AC de Eutectic
Operador: Diego Cadena

Parámetros de los Gases

Gases	C_3H_8	O_2	N_2	Aire
Presión	90 psi	150 psi	75 psi	120 psi
Caudal	50 SCFH	260 SCFH	35 SCFH	-
Consumo	0.069 m³	0.360 m³	0.048 m³	-

Parámetros de Movimiento

Patrón de metalizado: 90°±20°
Distancia pistola-sustrato: 230 mm
Movimiento relativo p-s: 1.45 mm/seg.
Numero de pases: 268 (individual)
Tiempo entre pases: - **Tiempo Total:** 176 seg

Parámetros del Recubrimiento

Recubrimiento: WC – 12Co
Espesor del recubrimiento: 0.429 mm.
Velocidad de alimentación: 0.85 gr/seg.
Consumo real del polvo: 150 gr
Estimación del consumo: 332 gr
(1.89 gr/seg ó 5 lb/h)
Observaciones: El consumo es el total entre las probetas y placas metalizadas.

OPERACIONES PORSTERIORES

Operador:
Proceso:
Observaciones: No se hizo ninguna operación posterior, porque fueron probetas para ensayos.

INSPECCIÓN DEL PROCESO

INSPECTOR	EMPRESA
Yanez Montezuma Omar	Ing. Juan Carlos Araujo

ANEXO VIII. Norma ASTM C633 – 13

Designation: C633 – 13

Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings[1]

This standard is issued under the fixed designation C633; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the degree of adhesion (bonding strength) of a coating to a substrate or the cohesion strength of the coating in a tension normal to the surface. The test consists of coating one face of a substrate fixture, bonding this coating to the face of a loading fixture, and subjecting this assembly of coating and fixtures to a tensile load normal to the plane of the coating. It is adapted particularly for testing coatings applied by thermal spray, which is defined to include the combustion flame, plasma arc, two-wire arc, high-velocity oxygen fuel, and detonation processes for spraying feedstock, which may be in the form of, wire, rod, or powder.

NOTE 1—Thermal spray coating materials include ceramics, such as metal oxides or carbides, and metals. In some cases, a coating is formed of different spray materials, such as an oxide layer sprayed onto a sprayed metal-bonding layer. The substrate generally is a metal, but may be a ceramic, such as an oxide or graphite.

1.2 Usually this test method is performed at ambient temperature. Higher temperature testing is restricted by the need for a suitable adhesive bonding agent. For certain fundamental investigations, it is suggested that very low (cryogenic) temperature be used.

1.3 This test method is limited to testing thermal spray coatings that can be applied in thickness greater than 0.015 in. (0.38 mm). The limitation is imposed because an adhesive bonding agent is used in the test. Those bonding agents established so far for this method tend to penetrate thermal spray coatings and may invalidate results unless the coatings are thick enough to prevent penetration through the coating. Further development may establish that thin layers of certain types of especially dense coatings may be tested satisfactorily. Alternatively, new adhesive bonding agents that would allow reduction of the minimum thickness limitation may become available.

1.4 The values stated in inch-pound units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are mathematical conversions to SI units that are provided for information only and are not considered standard.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

3. Significance and Use

3.1 This test method is recommended for quality control, acceptance testing; or it may help to develop or qualify a thermal spray operator's equipment and procedure or to aid in developing thermal spray coatings with improved adhesion and integrity.

3.2 This test method is useful for comparing adhesion or cohesion strengths of coatings of similar types of thermal spray materials. The test should not be considered to provide an intrinsic value for direct use in making calculations, such as to determine if a coating will withstand specific environmental stresses. Because of residual stresses in thermal spray coatings, actual strength depends upon the shape of the particular coated part. Also, in use, a coating may be stressed in a more complex manner than is practical for a standard test.

4. Apparatus

4.1 A tension testing machine shall conform to the requirements of Practices E4. The loads used in determining the adhesion or tensile strength shall be within the loading range of the testing machine, as defined in Practices E4. Permissible variation shall be less than 1.0 %. It shall be possible to apply increasing tensile load at a constant rate of cross-head travel between 0.030 in./min (0.013 mm/s) and 0.050 in./min (0.021

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee B08 on Metallic and Inorganic Coatings and is the direct responsibility of Subcommittee B08.12 on Materials for Porcelain Enamel and Ceramic-Metal Systems.

Current edition approved Dec. 1, 2013. Published December 2013. Originally approved in 1969. Last previous edition approved in 2008 as C633 – 01(2008). DOI: 10.1520/C0633-13.

[2] For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Nov 3 06:29:48 EST 2015
Downloaded/printed by
Jenny Jones (Mecmesin Ltd) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

mm/s). The machine shall include a load-indicating device that registers the maximum load applied before rupture occurs.

4.2 Self-aligning devices, for applying the tensile load to the assembly of the coating and fixtures, shall not permit eccentric load or bending moment to the specimen. Self-alignment is often provided by the manufacturer as an integral part of the testing machine. An alternative, satisfactory apparatus is shown in Fig. 1, which also shows methods of connecting the self-aligning apparatus to an assembled test specimen.

5. Material

5.1 *Adhesive Bonding Agent*—A suitable adhesive bonding agent shall be agreed between the purchaser and manufacturer of the coating and shall meet the following requirements.[3]

5.1.1 The bonding agent shall be capable of bonding the coating to the loading fixture with a tensile strength that is at least as great as the minimum required adhesion and cohesion strength of the coating.

5.1.2 The bonding agent shall be sufficiently viscous not to penetrate through a 0.015-in. (0.38-mm) thickness of the coating. Certain commercial resins that cure or harden at room temperature by means of a curing agent have been proven satisfactory. If any other bonding agent is to be used, it shall first be compared with a proven bonding agent using this test method with the desired thermal spray coating.

NOTE 2—Thermal spray coatings may have an inherent porosity. Excessive penetration of the adhesive bonding agent into this porosity may affect the results determined by this test method. Unless proved satisfactory by comparison testing, any agent requiring elevated temperature for curing should be avoided because viscosity may decrease at high temperature, allowing penetration.

NOTE 3—When liquid epoxy bonding agents are used, there should be

[3] A list of satisfactory bonding agents is provided in the annex which follows this standard.

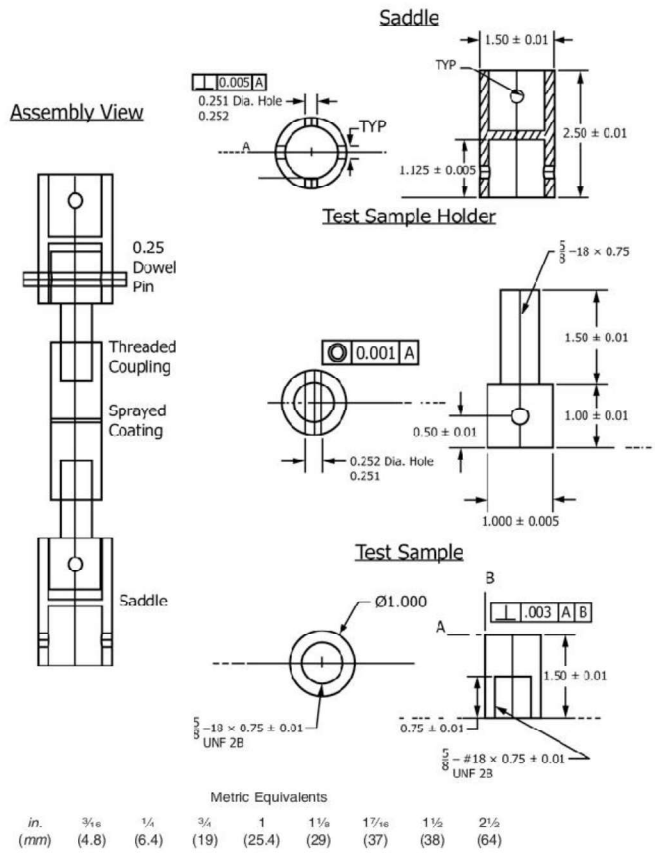


FIG. 1 Self-Aligning Device

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Nov 3 06:29:48 EST 2015
Downloaded/printed by
Jenny Jones (Mecmesin Ltd) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

a procedure in place to ensure relatively consistent thickness on every sample.

5.1.3 The adhesion strength of the bonding agent shall be determined each time this test method is performed. This shall be done by using the bonding agent to attach a loading fixture to a second loading fixture, in accordance with 6.5, except that the coated substrate fixture of 6.5 is replaced with the second loading fixture.

NOTE 4—One reason for testing the bonding agent each time is to detect improper preparation of the agent if it is a two-part mix. Another reason is that adhesion strength generally decreases with age of the unused agent. If strength is lower than required, more adhesive bonding agent shall be prepared and tested, or the agent shall be discarded and replaced.

6. Test Specimens

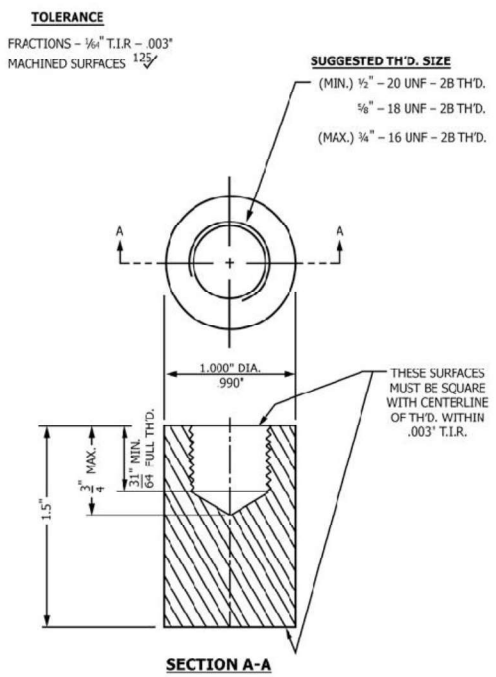
6.1 *Substrate and Loading Fixtures*— Each test specimen is an assembly comprising a substrate fixture, to which the coating is applied, and a loading fixture. The substrate and loading fixtures shall each be circular, solid cylinders of no less than 1.5 in. in length, or as agreed upon by the manufacturer and customer. A suggested detail for either fixture is shown in Fig. 2. One end of each fixture shall be adapted for attachment to the self-aligning loading devices of the tension testing machine. Both ends of each fixture shall have faces parallel to each other and normal to the loading axis. The facing diameters shall be not less than 0.9 in. (23 mm), nor more than 1.0 in. (25 mm). The diameters of the two fixtures shall be the same and shall be measured so that the error is no greater than 0.5 %.

NOTE 5—In Appendix X1, an alternative substrate and fixture arrangement is provided that has proved cost effective and simple.

6.1.1 *Material for Substrate Fixture*— The substrate fixture shall be constructed of metal, preferably metal intended for use as the substrate for the coating. If no such substrate material is specified, the substrate fixture shall be SAE 1018 or 1020 steel.

NOTE 6—If desired because of cost or ease of fabrication, it may be suitable to attach or bond a layer of the specified substrate material to a fixture formed of any convenient metal. Such a layer of substrate material need not be metal. The layer must be substantially thicker than the possible depth of effects on the substrate, such as recrystallization or diffusion zones, that may result from applying the coating. A layer greater than 0.1 in. (2.5 mm) thick should be sufficient.

6.1.2 *Material for Loading Fixture*—The loading fixture shall be constructed of metal, but material is otherwise optional. It is usually convenient to make the loading fixture of



U.S.	0.003 in.	1/64 in.	31/64 in.	1/2 in.	5/8 in.	
Metric	(0.08 mm)	(0.39 mm)	(12.3 mm)	(12.7 mm)	(15.9 mm)	
U.S.	3/4 in.	0.990 in.	1 in.	1.000 in.	1 ft.	24 in.
Metric	(19 mm)	(25.15 mm)	(25.4 mm)	(25.4 mm)	(0.3 m)	(610 mm)

FIG. 2 Substrate and Loading Fixture

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Nov 3 06:29:48 EST 2015
Downloaded/printed by
Jenny Jones (Mecmesin Ltd) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

the same material as the substrate fixture; thus, the fixtures may be interchangeable until a coating is applied to one.

6.2 *Coating Application*—The front facing of the substrate fixture shall be prepared in the manner required by the specification for the coating. (Roughening by grit blasting or surface grinding may be typical preparations.) The coating shall be thermal sprayed onto this prepared surface.

6.3 *Coating Thickness*—The coating thickness shall be measured with a micrometer by measuring the total length of the coating fixture before and after the coating is applied. (Care must be taken to avoid contaminating the prepared surface before coating.) The final coating thickness shall be more than 0.015 in. (0.38 mm). If the coating is to be ground or machined, the as-sprayed coating shall be approximately 0.005 in. (0.13 mm) thicker to allow for removal of material. The coating thickness shall not vary across the surface by more than 0.001 in. (0.025 mm). (This thickness variation, as measured from the rear face, does not refer to the ordinary surface texture or roughness typical of thermal spray coatings.) If, upon completion of the thermal spraying, the coating thickness varies in excess of this limit, this shall be corrected by removing the coating and respraying or by grinding or machining the coating surface.

6.4 *Grinding or Machining the Coating Surface*—The surface of the coating may be finished by grinding or machining when the thickness variation is excessive. If the thickness variation is not excessive, it shall be optional to finish the surface of the coating as a useful and convenient aid in holding the fixtures together parallel and aligned as required for the next step. No specific grinding or machining procedure can be recommended, as this depends on the type of coating material. Usually manufacturers of the coatings have recommendations published or available. Only a rough grinding or machining step is needed, to provide a final coating thickness that does not vary by more than 0.001 in. (0.025 mm). Removal rate shall be insufficient to damage the coating or bond. A recommended method is to use a surface grinder with a magnetic chuck, positioning the rear face of the coated fixture on this magnetic chuck. No other treatment, such as grit blasting, shall be done to the surface of the coating.

6.5 *Attachment of Fixtures*—The facing of the loading fixture shall be free of oil, grease, or grinding or cutting fluids. The facing shall be mechanically cleaned by such means as machining, grinding, light grit blasting, or rubbing with emory cloth. This facing shall be attached to the surface of the coating, using the adhesive bonding agent according to its manufacturer's instructions. Excessive adhesive shall be wiped from the assembly with soft paper or cloth. The two fixtures shall be held together parallel and aligned until the bonding agent is cured or hardened. A suitable holding device such as a "V-block" shall be used for the purpose, except such a device is not necessary if the surface of the coating has been ground or machined smooth.

6.6 *Number of Test Specimens*—The number of test specimens chosen depends upon the purpose of the particular tests under consideration. However, if specimens are to be used for acceptance tests, not less than five specimens of a type shall be tested.

7. Procedure

7.1 Prepare the chosen number of substrate fixtures, and apply a thermal spray coating to each. Finish the coating surface if required.

7.2 Prepare the adhesive bonding agent. Attach cleaned loading fixtures to all the coated substrate fixtures at essentially the same time. In addition, prepare one set of uncoated fixtures for measurement of the adhesion strength of the bonding agent.

7.3 Apply a tensile load to each test specimen at a constant rate of cross-head travel between 0.030 in./min (0.013 mm/s) and 0.050 in./min (0.021 mm/s) until rupture occurs. Record the maximum load applied.

NOTE 7—Loading fixtures may be gravity or pressure devices. The design of the loading fixtures should enable the correct alignment of the specimen.

8. Calculation

8.1 Calculate the degree of adhesion or cohesion strength as follows:

$$\text{Adhesion or cohesion strength} = \text{maximum load/cross} - \text{sectional area} \quad (1)$$

9. Interpretation of Results

9.1 Any interpretation of results depends on the purpose of using this test method and on the description of failure. The adhesion or cohesion strength value measured represents the weakest part of the system, whether in the coating or at an interface. A low-power microscope with a magnification range up to 100× is suggested for determining location of failure (also termed as the "locus" of failure).

9.2 The adhesion strength of the coating is given if failure is entirely at the coating-substrate interface.

9.3 The cohesion strength of the coating is given if rupture is only within the coating. Failure in the bonding agent may be a satisfactory result for a quality control assurance test or for a qualification test, if the strength of the bonding agent is greater than the minimum required adhesion or cohesion strength of the coating.

9.4 If failure occurs in a combination of these locations in one specimen, generally no interpretation of the initial cause can be provided. Fig. 3 diagrams the possible modes of failure.

9.5 For a multicomponent system; for example, a bond coat with a ceramic overlay, then failure at the interface between two coatings is described as "internal adhesive."

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Nov 3 06:29:48 EST 2015
Downloaded/printed by
Jenny Jones (Mecmesin Ltd) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

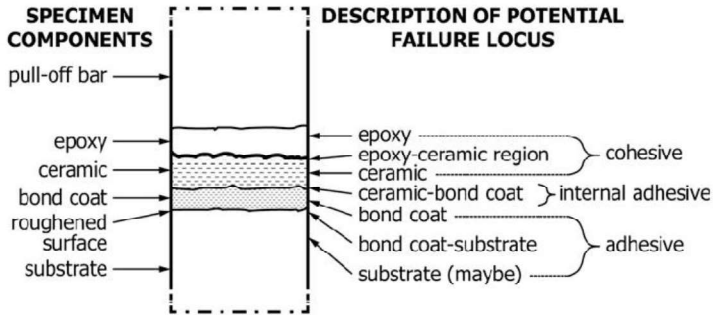


FIG. 3 Nomenclature of Specimen Components and Classification of Failure Locii

10. Report

10.1 The report shall include the following:

10.1.1 Coating material or manufacturer's designation technique used to apply the coating, including type of thermal spray equipment, and spray parameters.

10.1.2 Final coating thickness and statement of whether surface is finished or as-sprayed.

10.1.3 Substrate material.

10.1.4 Description of surface preparation of substrate.

10.1.5 Name or description of bonding agent and details of bonding procedure if different from manufacturer's instructions.

10.1.6 Number of thermal spray specimens and number of specimens tested.

10.1.7 The adhesion or cohesion strength of each specimen tested.

10.1.8 Average adhesion and cohesion strength, and the maximum and minimum values, in pounds per square inch (or pascals).

10.1.9 Description of failure, including statement of whether failure occurred at the coating-substrate interface, in the coating, in the bonding agent, or a combination of these. For multilayered coatings, an internal adhesion failure also must be indicated if it is present. Fig. 3 diagrams the possible modes of failure.

10.1.10 Adhesion strength of the bonding agent in the test specimen without a thermal spray coating.

11. Precision and Bias

11.1 No justifiable statements can be made regarding the precision and bias of this test method because it evaluates coatings that exhibit brittle fracture, an unpredictable characteristic.

11.2 This test method is applicable to a wide variety of materials with different characteristics.

11.3 Since design, base metal composition, fabrication, and processing, as well as thermal spraying the coating, will give rise to variables in adherence, each application of this test method should have tolerances and interpretation of adherence set and agreed upon between the purchaser and the manufacturer.

12. Keywords

12.1 adhesion strength; cohesion strength; fracture locus; thermal spray coatings

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. ADHESIVE BONDING AGENTS FOR ATTACHMENT OF LOADING FIXTURE TO THERMAL SPRAY COATINGS

A1.1 The following adhesive is recommended for attaching the loading fixture to thermal spray coatings that are primarily metallic or that have a metal matrix. It is not recommended for thermal spray oxide or other porous ceramic coatings because of the possibility of excessive penetration into the coating.

A1.1.1 Cytec FM-1000, available from Cytec Industries Inc., 5 Garret Mountain Plaza, Woodland Park, NJ 07424 (http://www.cytec.com/engineered-materials/aas_SOScenter.html). This is a one-part mix that is cured at 375 °F (190 °C) for a minimum of 1 h. When the adhesive is new,

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Nov 3 06:29:48 EST 2015
Downloaded/printed by
Jenny Jones (Mecmesin Ltd) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

typical adherence strength to thermal spray coatings may range up to approximately 10 000 psi (69 MPa) depending on the coating material.

A1.2 The following adhesives are recommended for attaching the loading fixture to thermal spray coatings of any type, ceramic or metallic. These are two-part mixes that should be cured at room temperature when used for this test method. When the adhesive is new, typical adherence strength to thermal spray coatings may range up to approximately 4 000 psi (28 MPa) depending on the coating material.

A1.2.1 Magna-Tac M666 (http://www.beaconadhesives.com/TechSheets/magna-tac_m666.htm) or M777 (http://www.beaconadhesives.com/TechSheets/m777.htm), manufactured by Beacon Adhesives Co., Inc., 125 MacQueslan Parkway South, Mount Vernon, NY 10550. Products were formerly known as Bondmaster M666 and M777. M777 may be easier to use as it may be more viscous than M666.

A1.2.2 Armstrong A-12 (http://apps.ellsworth.com/library/Library/TDS/en/TDS16909.pdf), manufactured by Resin Technology Group, LLC, 28 Norfolk Avenue, Easton, MA 02375. Armstrong Products Co., Argonne Rd., Warsaw, IN 46580.

A1.2.3 3M Scotch Weld Epoxy Adhesive EC-2214, sold by 3M Industrial Adhesives and Tapes Division, 3M Center, St. Paul, MN 55144-100.

APPENDIX

X1. ALTERNATIVE SUBSTRATE AND FIXTURE ARRANGEMENT

X1.1 See Fig. X1.1 for an alternative substrate and fixture arrangement that has proved cost effective and simple.

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Nov 3 06:29:48 EST 2015
Downloaded/printed by
Jenny Jones (Mecmesin Ltd) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

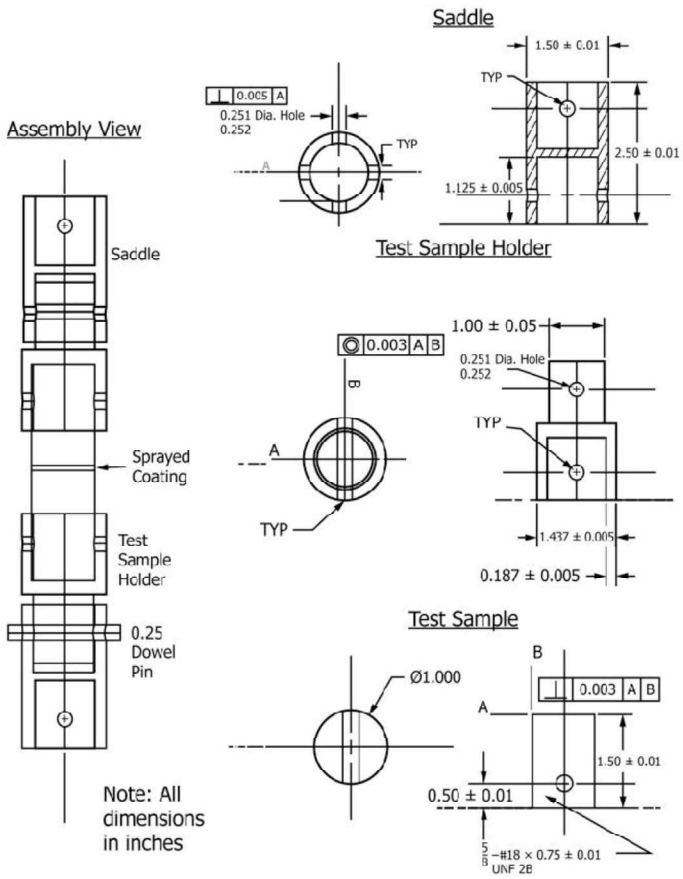


FIG. X1.1 Alternative Load Train Geometry for Test Assembly

BIBLIOGRAPHY

(1) F. J. Hermanek, "Determining the Adhesive and Cohesive Strengths of Thin Thermally Sprayed Coatings," *Welding J.*, Vol 57, 1978, pp. 31–35.

(2) P. Ostojic and C. C. Berndt, "Variability in Strength of Thermally Sprayed Coatings," *J. Surf. Coat. Tech.*, Vol 34, 1988, pp. 43–50.

(3) C. C. Berndt, "Tensile Adhesion Testing Methodology for Thermally Sprayed Coatings," *ASM J.Mater.Eng.* , Vol. 12, No. 2, 1990, pp. 151–160.

(4) W. Han, E. F. Rybicki, and J. R. Shadley, "An Improved Specimen Geometry for ASTM C633–79 to Estimate Bonds Strengths of Thermal Spray Coatings," *J. Thermal Spray Technology*, Vol. 2, No. 2, 1993, pp. 145–150.

(5) C. K. Lin and C. C. Berndt, "Measurement and Analysis of Adhesion Strength for Thermally Sprayed Coatings," *J. Thermal Spray Technology*, Vol. 3, No. 1, 1994, pp. 75–104.

(6) D. J. Greving, J. R. Shadley, and E. F. Rybicki, "Effects of Coating Thickness and Residual Stresses on the Bond Strength of ASTM C633–79 Thermal Spray Coating Test Specimens," *J. Thermal Spray Technology*, Vol. 3, No. 4, 1994, pp. 371–378.

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Nov 3 06:29:48 EST 2015
Downloaded/printed by
Jenny Jones (Mecmesin Ltd) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

ANEXO IX. EP15 Master Bond

EP15 Master Bond Polymer System

One part epoxy for testing adhesion or cohesive strength of flame-sprayed coatings

Key Features

- ✓ "Go-to" material for use in ASTM C633 testing applications
- ✓ Exceptionally high tensile strength
- ✓ Excellent dimensional stability
- ✓ Low shrinkage upon cure
- ✓ Withstands 1,000 hours 85°C/85% RH

Product Description

Master Bond EP15 is a one component, heat curing epoxy featuring high tensile strength utilized in testing the adhesion and/or cohesive strength of flame-sprayed coatings. This standard test is fully detailed in ASTM specification C633. EP15 is formulated to cure at temperatures from 300-350°F for 60-90 minutes. Upon cure, EP15 has a tensile strength well in excess of 12,000 psi. EP15 forms rigid and dimensionally stable bonds with minimal shrinkage upon cure. It is 100% reactive and does not contain any solvents or diluents. Its service temperature range is -60°F to +250°F.

As a one component epoxy, EP15 is easy to handle as it does not require mixing prior to use. Its working life at room temperature is unlimited because it is not premixed and frozen. It bonds well to a wide variety of substrates, but most pertinent is its exceptionally good adhesion to metals and ceramics especially those that are flame-sprayed. The standard color of the epoxy is tan. Although primarily used in the flame sprayed coating test, EP15 can also be utilized in any bonding application where high tensile strength is a prerequisite. It is generally accepted that the liquid version of the epoxy is preferable when dealing with ceramic substrates while the paste version, called EP15ND-2, is preferable for metallic substrates.

Product Advantages

- Single component system; no mixing prior to use
- Unlimited working life at room temperature
- Exceptionally high tensile strength well exceeding 12,000 psi
- 100% reactive; contains no solvents or volatiles
- Bonds well to flame-sprayed coatings
- Very low shrinkage upon cure
- Excellent dimensional stability
- Specifically designed for testing under ASTM specification C633

Typical Properties

Specific gravity	1.45
Tensile strength, 75°F	12,000-14,000 psi
Tensile lap shear strength, aluminum to aluminum, 75°F	2,600-2,800 psi
Tensile modulus, 75°F	400,000-450,000 psi
Hardness, 75°F	80-90 Shore D
Hardness after 1,000 hours 85°C/85% RH	90 Shore D
Volume resistivity, 75°F	$>10^{14}$ ohm-cm
Service temperature range	-60°F to+250°F [-51°C to +121°C]

Typical Properties Cont'd

Shelf life at 75°F, in original, unopened containers	minimum 3 months; maximum 6 months
Viscosity, 75°F	40,000-65,000 cps
Color	tan
Cure schedule	
300-350°F	60-90 minutes
Optimum cure schedule	60-90 minutes at 300-350°F plus post cure 4-6 hours at 300-350°F

Preparation of Adhesive

Master Bond EP15 does not require any mixing before use. Some simple stirring is recommended if the adhesive has been stored for a prolonged time period without use. Such stirring should be done slowly to avoid entrapping air. Using the adhesive is easy. Simply apply the required amount and apply the adhesive on the surface to be bonded evenly and uniformly.

Preparation of Bonding Surfaces

When using EP15 for the flame-spray test, the procedure specified in ASTM specification C633 should be followed. In other bonding applications, all bonding surfaces should be carefully cleaned, degreased and dried to obtain the maximum bond strength. Metal and other surfaces should be chemically etched or mechanically abraded (e.g. sand blasted) for maximum bond strength. If this is not possible, surfaces should be roughened as much as possible with sandpaper or emery paper.

A simple yet effective test for surface cleanliness is to place a few drops of cool water on the surfaces to be bonded. Parts are sufficiently clean if the water spreads over the area with a continuous film. If the water beads or stays in puddles, use a solvent such as acetone, xylene or toluene for degreasing and repeat the water test before applying the adhesive.

Adhesive Application

In the flame sprayed test, the procedure is listed in the specification. If used for other bonding applications, EP15 can be conveniently applied with a spatula, knife, trowel, brush, paint roller, etc. Enough adhesive should be applied to obtain a bond line thickness of 3-7 mil. Porous surfaces may require somewhat more adhesive to fill the voids than non-porous ones. Thicker glue lines do not increase the strength of a joint but do not necessarily give lower results as the EP15 adhesive system does not contain any volatiles. The parts to be bonded should then be clamped together with just enough pressure to maintain intimate contact during cure. Care should be taken not to squeeze out the adhesive when fixturing. Since EP15 is 100% reactive and does not contain any solvents, shrinkage upon cure is minimal.

Cure

EP15 requires an elevated temperature cure. The recommended curing schedule is 60-90 minutes at 300-350°F for maximum bond strength. Only contact pressure need be applied during the curing process. Excess adhesive should be removed promptly before it hardens with a spatula. After removal of the excess adhesive, wipe with a rag and solvent such as acetone, toluene or lacquer thinner.

Packaging

Product is available in:

- 1/2 Pint
- Pint
- Quart
- Gallon
- 5 Gallon

Handling and Storage

All epoxies should be used with good ventilation and skin contact should be avoided. For safe handling details, please consult the product SDS. Optimum storage is at or below 75°F in closed containers. No special storage conditions are necessary. Containers should, however, be kept closed when not in use to avoid contamination. Cleanup of spills and equipment is readily achieved with aromatic or ketone solvents employing proper precautions of ventilation and flammability.

Certifications

RoHS COMPLIANT

Not to Be Used for Specification Purposes

The values contained herein are considered typical properties only and are not intended to be used as specification limits. For assistance in preparing specifications, please contact Master Bond technical support for further details.

Notice

Master Bond believes the information on the data sheets is reliable and accurate as is technical advice provided by the company. Master Bond makes no warranties, expressed or implied, regarding the accuracy of the information, and assumes no liability regarding the handling and use of this product.

ANEXO X. Informe Técnico – Ensayos de Microdureza (ASTM E384 – 07)

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

LABORATORIO DE MATERIALES

INFORME TÉCNICO

Quito, 01 de febrero del 2019

Trabajo solicitado por: Est. Yánez Montezuma Omar Ramiro

Los resultados que contienen en el presente informe corresponden a los ensayos de dureza de microindentación realizados en plaquitas de acero inoxidable 416 con recubrimiento de carburo de tungsteno. El ensayo de dureza de microindentación se aplicó bajo la norma ASTM E384 – 07.

Resultados:

1. **Resultados se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2.**

Tabla 1. Resultados de los ensayos de dureza Vickers en el WC-12Co.

Mediciones	Placa P1		Placa P2	
	C. Aplicada (Kgf)	Dureza Vickers (HV)	C. Aplicada (Kgf)	Dureza Vickers (HV)
1	0,5	414,40	0,5	581,00
2	0,5	541,00	0,5	457,90
3	0,5	363,60	0,5	475,70
4	0,5	372,40	0,5	399,90
5	0,5	365,00	0,5	424,20
6	0,5	313,90	0,5	478,90
7	0,5	404,10	0,5	831,20
8	0,5	381,50	0,5	566,70
9	0,5	500,30	0,5	482,20
10	0,5	372,60	0,5	342,90

Tabla 2. Resultados de los ensayos de dureza Vickers en el acero inoxidable 416.

Mediciones	Acero Inoxidable 416	
	C. Aplicada (Kgf)	Dureza Vickers (HV)
1	0,5	212,90
2	0,5	259,30
3	0,5	228,20
4	0,5	259,70

Firma:

Alfredo Valarezo, Ph.D.
Decano de Ingeniería Mecánica

ANEXO XI. Informe Técnico – Ensayos de adherencia (ASTM C633 – 13)

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

LABORATORIO DE MATERIALES

INFORME TÉCNICO

Quito, 01 de febrero del 2019

Trabajo solicitado por: Est. Yánez Montezuma Omar Ramiro

Director de Tesis: Ing. Homero Barragán

Los resultados que contienen en el presente informe corresponden a los ensayos de adherencia realizados en probetas de acero inoxidable 416 con recubrimiento de carburo de tungsteno perteneciente al Est. Yánez Montezuma Omar Ramiro de la EPN para la obtención del proyecto de titulación "ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE METALIZACIÓN POR HVOF DE UN EJE DE ACERO INOXIDABLE DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA".

Resultados:

1. **Muestras:** Cuatro (4) pares de probetas de acero inoxidable 416 con recubrimiento WC-12Co, y un (1) par sin recubrimiento.
2. **Ensayo de Adherencia bajo la norma ASTM C633 -13**

En la Tabla 1. se presenta los resultados del ensayo de adherencia realizado.

Tabla 1. Resultados del ensayo de adherencia (ASTM C633 - 13)

Probeta	Resistencia a la adhesión (PSI)
Par 1	5710
Par 2	6630
Par 3	11900
Par 4	12400
Par 5	12790

Nota: El Par 5 se realizó el ensayo solo con resina

Firma:

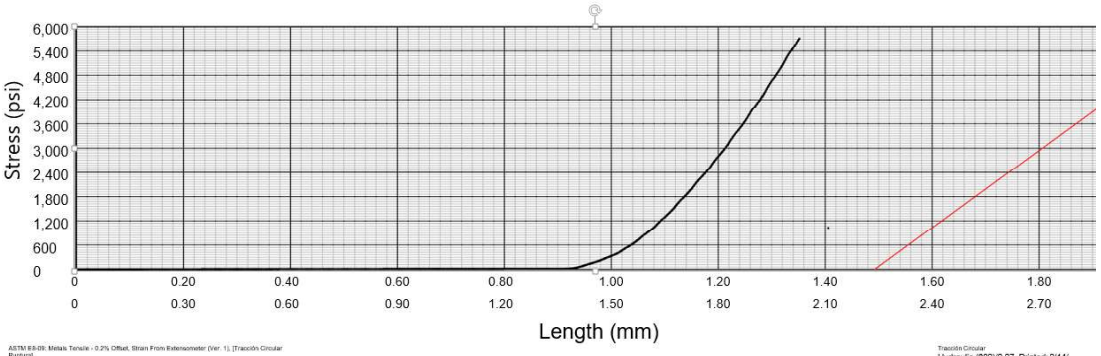
Alfredo Valarezo, Ph.D

Decano de Ingeniería Mecánica

ANEXO XI.1 Curvas esfuerzo vs deformación - ensayo de adherencia ASTM C633 – 13

Probeta Par 1

Width mm	Thickness mm	Area mm²	Modulus psi	Offset @ 0.2% N	Offset @ 0.2% MPa	Ultimate Force N	Ultimate Stress psi	TE (Manual) %
N/F	N/F	507	-2010000000	N/F	N/F	20000	5710	-100

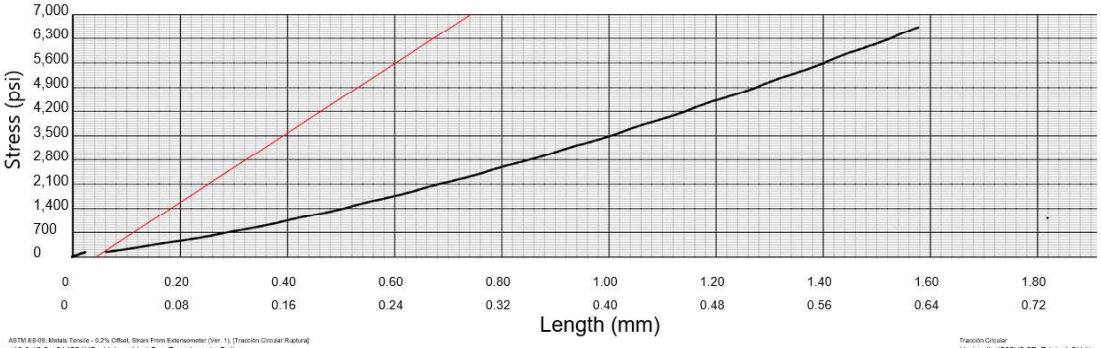


ASTM E8-09: Metals Tensile - 0.2% Offset, Strain From Extensometer (Ver. 1), [Tracción Circular Ruptura]
v10.0.13.0 - 314221US - Universidad San Francisco de Quito

Tracción Circular
Hydraulic (602)/2.27. Printed: 2/14/

Probeta Par 2

Width mm	Thickness mm	Area mm²	Modulus psi	Offset @ 0.2% N	Offset @ 0.2% MPa	Ultimate Force N	Ultimate Stress psi	TE (Manual) %
N/F	N/F	507	1300000000	N/F	N/F	23200	6630	-100

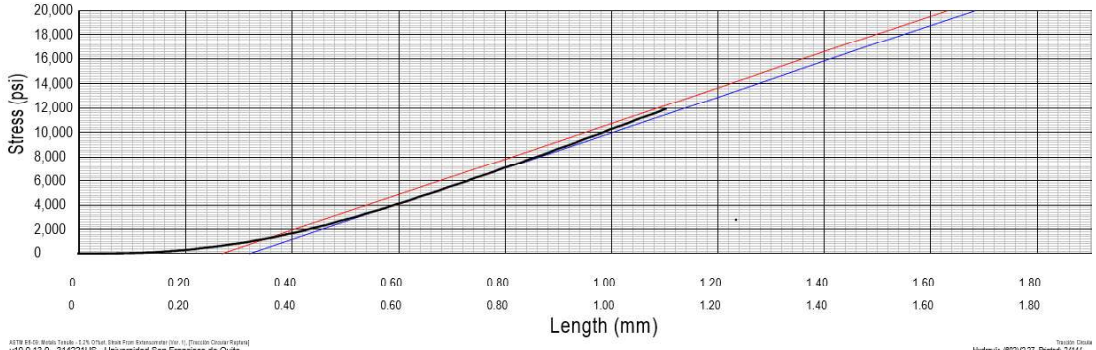


ASTM E8-09: Metals Tensile - 0.2% Offset, Strain From Extensometer (Ver. 1), [Tracción Circular Ruptura]
v10.0.13.0 - 314221US - Universidad San Francisco de Quito

Tracción Circular
Hydraulic (602)/2.27. Printed: 2/14/

Probeta Par 3

Width mm	Thickness mm	Area mm²	Modulus psi	Offset @ 0.2% N	Offset @ 0.2% MPa	Ultimate Force N	Ultimate Stress psi	TE (Manual) %
N/F	N/F	516	24700000	14100	27.4	42400	11900	-100



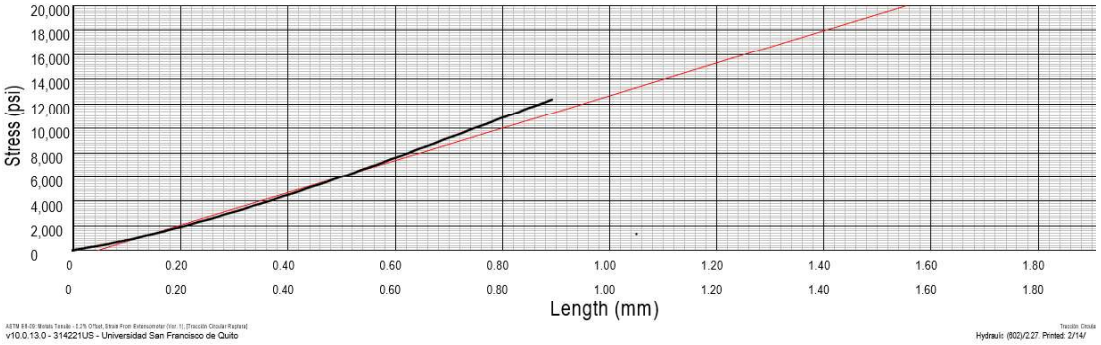
ASTM E8-09: Metals Tensile - 0.2% Offset, Strain From Extensometer (Ver. 1), [Tracción Circular Ruptura]
v10.0.13.0 - 314221US - Universidad San Francisco de Quito

Tracción Circular
Hydraulic (602)/2.27. Printed: 2/14/

ANEXO XI.2 Curvas esfuerzo vs deformación - ensayo de adherencia ASTM C633 – 13

Probeta Par 4

Width mm	Thickness mm	Area mm²	Modulus psi	Offset @ 0.2% N	Offset @ 0.2% MPa	Ultimate Force N	Ultimate Stress psi	TE (Manual) %
N/F	N/F	516	5780000	N/F	N/F	44100	12400	-100

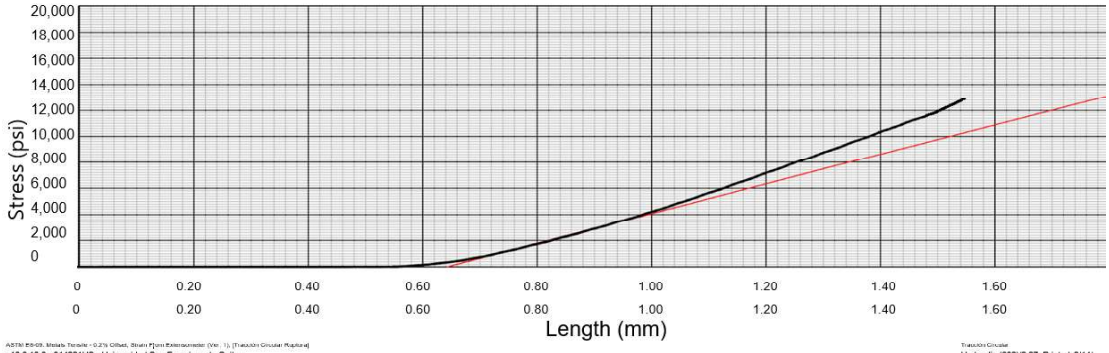


v10.0.13.0 - 314221US - Universidad San Francisco de Quito

Hydraulic (802)/2.27. Printed: 2/14/

Probeta Par 5

Width mm	Thickness mm	Area mm²	Modulus psi	Offset @ 0.2% N	Offset @ 0.2% MPa	Ultimate Force N	Ultimate Stress psi	TE (Manual) %
N/F	N/F	516	4790000	N/F	N/F	46200	12790	-100



v10.0.13.0 - 314221US - Universidad San Francisco de Quito

Hydraulic (802)/2.27. Printed: 2/14/

ANEXO XII. Informe Técnico – Ensayos Metalográficos (ASTM E407 – 07)

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

LABORATORIO DE MATERIALES

INFORME TÉCNICO

Quito, 01 de febrero del 2019

Trabajo solicitado por: Est. Yánez Montezuma Omar Ramiro

Director de Tesis: Ing. Homero Barragán

Los resultados que contienen en el presente informe corresponden a los análisis metalográficos realizados en placas de acero inoxidable 416 con recubrimiento de carburo de tungsteno perteneciente al Est. Yánez Montezuma Omar Ramiro de la EPN para la obtención del proyecto de titulación "ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE METALIZACIÓN POR HVOF DE UN EJE DE ACERO INOXIDABLE DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA".

Resultados:

1. **Muestras:** Dos (2) plaquitas de acero inoxidable 416 con recubrimiento WC-12Co.
2. **Ensayo metalográficos bajo la norma ASTM E407 – 07**
3. **Las metalografías están en anexos.**

Las imágenes metalográficas fueron hechas con un microscopio Nikon Eclipse. Las imágenes metalográficas se encuentran anexas a continuación.

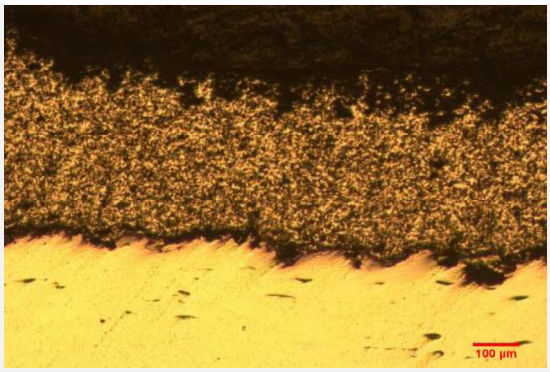
Firma:

Alfredo Valarezo, Ph.D.

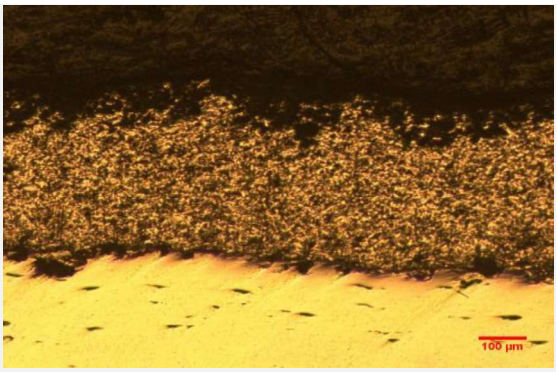
Decano de Ingeniería Mecánica

ANEXO XII.1 Imágenes – Ensayos Metalográficos (ASTM E407)

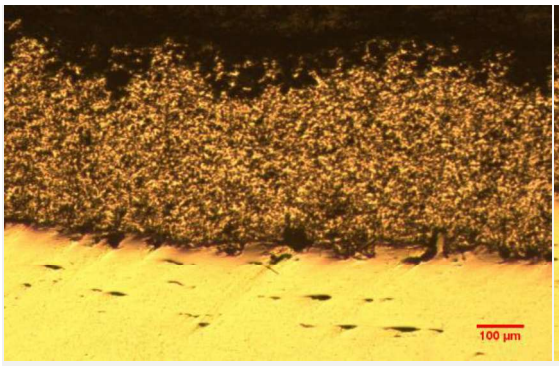
Imágenes metalográficas Sustrato – Recubrimiento



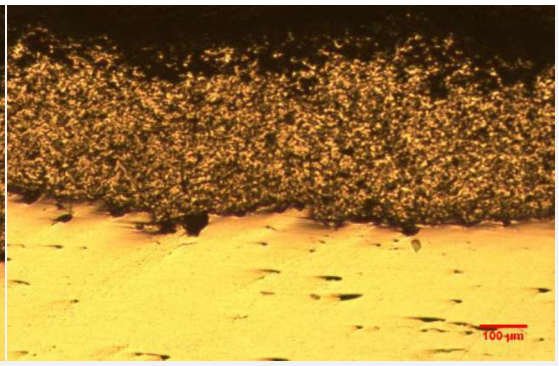
Placa P1 – M1



Placa P1 – M2



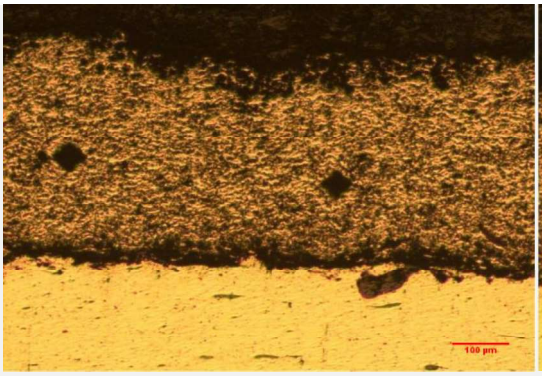
Placa P2 – M1



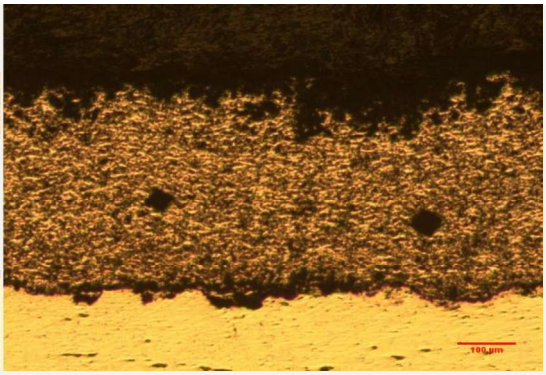
Placa P2 – M2

ANEXO XII.2 Imágenes – Ensayos Metalográficos (ASTM E407)

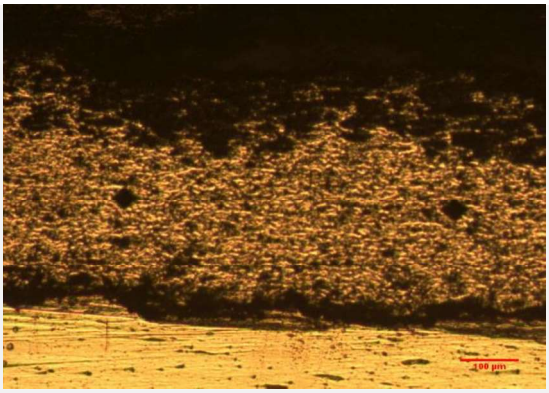
Imágenes metalográficas de la Microindentación



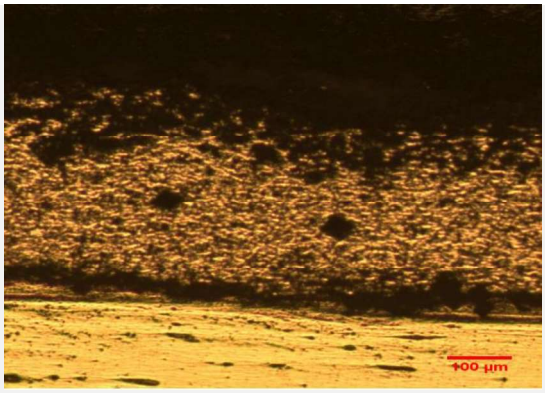
Placa P1 – M1



Placa P1 – M2



Placa P2 – M1



Placa P2 – M2

ANEXO XIII. Medición de espesores de las placas P1 y P2

Tabla 3.10.1. Medición de espesores para las placas P1 y P2. Antes de metalizar.

Tornillo micrométrico						
Placas	Mediciones (mm)					Espesor inicial (mm)
P1	4,32	4,34	4,35	4,33	4,34	4,336
P2	4,32	4,33	4,34	4,33	4,34	4,332

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10.2. Medición de espesores para las placas P1 y P2. Después de metalizar.

Tornillo micrométrico						
Placas	Mediciones (mm)					Espesor final (mm)
P1	4,72	4,68	4,88	4,75	4,71	4,748
P2	4,78	4,81	4,82	4,86	4,85	4,824

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Resultado de la medición de espesores del recubrimiento para las placas P1 y P2.

Tornillo micrométrico			
Placas	Espesor final (mm)	Espesor inicial (mm)	Espesor del recubrimiento
P1	4,748	4,336	0,412
P2	4,824	4,332	0,492

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Resultados de la medición de espesores del recubrimiento para las placas P1 y P2 con el medidor portátil.

Medidor de espesor portátil						
Placas	Mediciones (mm)					Espesor del recubrimiento (mm)
P1	0,402	0,398	0,405	0,401	0,404	0,402
P2	0,490	0,485	0,478	0,487	0,498	0,488

(Fuente: Propia)

ANEXO XIV. Medición de espesores en probetas para ensayos de adherencia

Las siguientes tablas se muestras las mediciones del espesor del recubrimiento para las probetas que se van a utilizar en los ensayos de adherencia.

Tabla 3.12.1. Medición de la longitud de las probetas que se les va aplicar el metalizado.

Tornillo micrométrico							
Probetas		Mediciones (mm)					Medición inicial (mm)
1	A	37,95	37,94	37,95	37,95	37,94	37,95
2	A	38,07	38,12	38,08	38,07	38,12	38,09
3	A	38,07	38,07	38,07	38,07	38,07	38,07
4	A	37,97	37,95	37,97	37,95	37,95	37,96

(Fuente: Propia)

Tabla 3.12.2. Medición de la longitud de las probetas con el recubrimiento.

Tornillo micrométrico							
Probetas		Mediciones (mm)					Medición final (mm)
1	A	38,21	38,31	38,35	38,41	38,42	38,34
2	A	38,38	38,41	38,45	38,41	38,43	38,42
3	A	38,47	38,41	38,45	38,42	38,43	38,44
4	A	38,35	38,34	38,34	38,33	38,34	38,34

(Fuente: Propia)

Tabla 3.12. Resultado del espesor del recubrimiento de las probetas metalizadas para los ensayos de adherencia.

Tornillo micrométrico				
Probetas		Medición final (mm)	Medición inicial (mm)	Espesor del recubrimiento (mm)
1	A	38,34	37,95	0,394
2	A	38,42	38,09	0,324
3	A	38,44	38,07	0,366
4	A	38,34	37,96	0,382

(Fuente: Propia

ORDEN DE EMPASTADO