UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Proyecto Técnico:

"RECUBRIMIENTO DE UNA CAPA DURA EN UNA ALEACIÓN DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 PARA MEJORAR SU RESISTENCIA AL DESGASTE"

Autor:

Daniel Alejandro Reinoso Zhindón

Tutor:

Ing. Luis Marcelo López López

Cuenca – Ecuador

2019

Cesión de Derechos de Autor

Yo, *Daniel Alejandro Reinoso Zhindón*, con documento de identificación N° 0104796065, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: ***"RECUBRIMIENTO DE UNA CAPA DURA EN UNA ALEACIÓN DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 PARA MEJORAR SU RESISTENCIA AL DESGASTE"***, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Daniel Alejandro Reinoso Zhindón
C.I. 0104796065

Certificación

Yo, declaro que bajo mi tutoría, fue desarrollado el trabajo de titulación***: "RECUBRIMIENTO DE UNA CAPA DURA EN UNA ALEACIÓN DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 PARA MEJORAR SU RESISTENCIA AL DESGASTE"***, realizado por *Daniel Alejandro Reinoso Zhindón*, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Ing. Luis Marcelo López López
C.I. 0102906971

Declaratoria de Responsabilidad

Yo, *Daniel Alejandro Reinoso Zhindón*, con número de cédula 0104796065, autor del trabajo de titulación: ***"RECUBRIMIENTO DE UNA CAPA DURA EN UNA ALEACIÓN DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 PARA MEJORAR SU RESISTENCIA AL DESGASTE"***, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Daniel Alejandro Reinoso Zhindón
C.I. 0104796065

Dedicatoria

Este proyecto lo dedico:

A Dios por haberme dado la oportunidad, destreza y sabiduría necesaria para enfocarme en una carrera profesional muy fascinante.

A mi madre Susana, quien supo apoyarme de todas las maneras posibles por verme profesional, de igual manera a mis hermanos Cristina y Esteban, quienes han estado de manera incondicional en este transcurso de mi vida académica.

De manera especial, a mi abuelo Luis Zhindón (Lolito) que en paz descanse y a mi tío Napoleón Zhindón por haberme incentivado al camino de la Ingeniería Mecánica, depositando su confianza, sus valores y conocimientos en mí.

Pachu

Agradecimientos

Agradezco en primera instancia a mi Poder Superior, quien ha sabido interceder en mi toma de decisiones brindándome serenidad, sabiduría y valor.

A toda mi familia, quienes han sido de gran ejemplo para prepararme cada día de manera personal, religiosa, académica y laboral.

A la Constructora Mejía por haberme permitido desde un inicio desarrollar este proyecto como aplicación a sus elementos de fundición.

A la Universidad San Francisco de Quito (U.S.F.Q.) por haberme brindado apoyo con el uso de sus laboratorios.

En especial agradezco al Ph.D. Alfredo Valarezo, Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.S.F.Q.; quien me abrió las puertas para desarrollar el proceso metodológico de este proyecto. De igual manera al M.Sc. Marco León, Docente especializado en Materiales de la U.S.F.Q.; por haber sido mi orientador dentro de los laboratorios de la universidad.

A la empresa Imetca Cía. Ltda. de la ciudad de Quito, por haber colaborado con su tecnología en recubrimientos sobre material base.

A mis compañeros universitarios, con quienes siempre nos apoyamos mutuamente. De igual manera a mis amigos más allegados por preocuparse de mi estado de ánimo cada momento.

Finalmente agradezco a todos mis estimados profes de la carrera, por tener la paciencia y el don de enseñar: "No es buen profesor quien más sabe, sino quien mejor enseña".

Daniel Alejandro

Resumen

Este proyecto técnico presenta el estudio y trabajo realizado para la obtención de un recubrimiento duro sobre un acero inoxidable AISI 304 fundido en la Constructora Mejía, éste tipo de acero ha ocasionado fallas inesperadas en equipos industriales en determinadas condiciones de servicio, siendo una de las causas principales su desgaste y corrosión cuando se encuentra en contacto con diferentes ambientes de trabajo y soluciones corrosivas. Consecuentemente, se sigue una serie de pasos para la determinación correcta del material de aporte sobre el material base.

Se obtuvo una probeta mediante la fundición y mecanizado, luego se ejecutó pruebas en un espectrómetro hasta conseguir la composición química del sustrato, posteriormente fue llevado a un laboratorio para ensayos metalográficos donde se definió el tipo de recubrimiento ideal adherente sobre el sustrato (probeta). Finalmente, en la probeta se realizó el pertinente rociado térmico con el recubrimiento ideal para análisis de microdureza y desgaste en comparación de las anteriores (sin recubrimiento).

Los resultados determinados muestran que la probeta recubierta con la capa dura adquirió una mayor resistencia al desgaste en comparación a la del material base, debido al estudio metalográfico minucioso realizado anteriormente. De igual manera los resultados son diferentes en cuanto a la microdureza después de haber sido sometido al tratamiento por rocío. En la máquina interfirieron ciertos parámetros como: temperatura, voltaje, atomización, gases, distancia, presión; que modificaron sus propiedades.

Palabras clave: Rociado térmico, desgaste, recubrimiento, atomización, composición química, fundición.

Abstract

This technical project presents the study and work carried out to obtain a hard coating on an AISI 304 stainless steel cast at the Mejía Construction Company, this type of steel has caused unexpected failures in industrial equipment in certain service conditions, being one of the main causes of its wear and corrosion when it is put in contact with different work environments and corrosive solutions. Consequently, a series of steps is followed to the correct determination of the filler material on the base material.

A test piece was obtained by casting and machining, then tests were performed on a spectrometer until the chemical composition of the substrate was obtained, later it was taken to a laboratory for metallographic tests where the type of ideal adherent coating on the substrate (test piece) was defined. Finally, the appropriate thermal spraying was carried out on the specimen with the ideal coating for microhardness and wear analysis compared to the previous ones (without coating).

The determined results show that the specimen covered with the hard layer acquired a greater wear resistance compared to that of the base material, due to the detailed metallographic study carried out previously. In the same way, the results are different in terms of microhardness after having been subjected to spray treatment. In the machine interfered certain parameters such as: temperature, voltage, atomization, gases, distance, pressure; that modified their properties.

Keywords: Thermal spraying, wear, coating, atomization, chemical composition, casting.

Contenido

1. Introducción ... 1
2. Planteamiento del problema ... 3
2.1. Antecedentes ... 3
2.2. Problema general ... 3
2.3. Problemas específicos ... 3
2.4. Importancia y alcances ... 4
2.5. Delimitación ... 4
3. Objetivos ... 4
3.1. Objetivo general ... 4
3.2. Objetivos específicos ... 5
4. Matriz de consistencia ... 6
5. Marco teórico ... 7
5.1. Acero inoxidable ... 7
5.1.1. Acero Inoxidable Austenítico ... 8
5.2 Maquinaria Industrial ... 8
5.3 Recubrimiento Duro ... 8
5.3.1 Materiales usados como recubrimientos duros ... 9
5.4 Sustrato (material base) ... 9
5.5 Espectrometría de masas ... 10
5.6 Desgaste ... 11
5.6.1 Desgaste abrasivo ... 11
5.6.2 Desgaste adhesivo ... 12
5.6.3 Desgaste por corrosión ... 12
5.6.4 Desgaste por fatiga ... 13
5.7 Metalografía ... 13
5.8 Rociado Térmico (Thermal Spray) ... 13
5.9 Técnicas de Proyección Térmica ... 14
5.9.1 Proceso de Llama/Alambre ... 15
5.9.2 Proceso de Llama/Polvo ... 15
5.9.3 Proceso de Combustible-Oxígeno de Alta Velocidad (HVOF) ... 16
5.9.4 Proceso de Rociado por Pistola de Detonación ... 16
5.9.5 Proceso de Rociado por Plasma en Aire APS ... 17
5.9.6 Proceso de Rociado por Plasma en Vacío VPS ... 17
5.9.7 Proceso por Rociado en Frío ... 18
5.10 Parámetros del proceso ... 18
5.10.1 Proceso de proyección ... 18
5.10.2 Materiales ... 19

5.10.3 Propiedades de recubrimiento 20
5.10.4 Otros 20
6. Marco Metodológico 21
6.1 Metodología del proceso 21
6.1.1. Obtención del material base o sustrato ("Constructora Mejía") 21
6.1.2. Obtención de la composición química del material base ("Constructora Mejía") 23
6.1.3. Análisis metalográfico ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ) 25
6.1.4. Ataque químico - electroquímico e identificación microscópica ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ) 28
6.1.5. Aplicación por recubrimiento duro 32
6.1.6. Ensayo de Desgaste abrasivo ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ) 36
6.1.7. Ensayo de Microdureza Vickers y Medición de altura por desgaste ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ) 39
7. Resultados 41
7.1. Obtención del material base 41
7.2. Determinación de la composición química del material del material base 41
7.3. Obtención de imágenes por ataque químico, electropulido y electroquímico en muestras metalográficas 42
7.4. Obtención de datos por ensayos de desgaste abrasivo, microdureza Vickers y medición de altura por desgaste. 51
7.4.1. Ensayo de desgaste abrasivo 51
7.4.2. Ensayo de microdureza Vickers 55
7.4.3. Medición de altura por desgaste 63
8. Conclusiones 65
9. Recomendaciones 66
10. Referencias bibliográficas 67
Anexos 71

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidables recocidos seleccionados.....7
Tabla 2. Distintas técnicas de T.S. agrupadas de acuerdo con el tipo de fuente de energía empleado.....14
Tabla 3. Soluciones de ataque Químico y Electroquímico para un acero AISI 304.....29
Tabla 4. Parámetros de la deposición por Arc Spray.....33
Tabla 5. Parámetros de procedimientos para desgaste abrasivo.....36
Tabla 6. Resultados de obtención del material base 41
Tabla 7. Composición química del material base 41
Tabla 8. Determinación de ataque químico 80_91. 42
Tabla 9. Determinación electropulido ASTM E 1558-93 _ASTM E407-07$^{\varepsilon 1}$.....45
Tabla 10. Determinación de ataque electroquímico 91_AO 49
Tabla 11. Ensayo: sustrato + 60T 51
Tabla 12. Ensayo: sustrato + 75B + 60T 52
Tabla 13. Ensayo: sustrato + 75B + 140/60T 53
Tabla 14. Ensayo: sustrato + Arc720.....54
Tabla 15. Ensayo: sustrato S.R. 54
Tabla 16. Datos de mediciones 60T.....55
Tabla 17. Datos de mediciones 75B + 60T. 58
Tabla 18. Datos de mediciones 75B + 140/60T 60
Tabla 19. Datos de mediciones sustrato 62

Índice de figuras

Figura 1. Aplicación de recubrimientos duros en componentes metálicos. 9
Figura 2. Principios para la espectrometría de masas de biomoléculas.....10
Figura 3. Ilustración de dos formas de desgaste abrasivo: (a) una superficie áspera y dura deslizando sobre una superficie más blanda y (b) partículas abrasivas libres (tercer cuerpo) atrapadas entre las superficies.....12
Figura 4. Desgaste adhesivo 12
Figura 5. Corrosión electroquímica. 13
Figura 6. Desgaste por fatiga entre dos superficies en deslizamiento.....13
Figura 7. Estructura típica de un revestimiento rociado térmicamente.....14
Figura 8. Proceso de rociado por Llama-Alambre..... 15
Figura 9. Proceso de Rociado por Llama-Polvo 15
Figura 10. Proceso de Rociado por flama 16
Figura 11. Proceso de HVOF – Jet Kote 16
Figura 12. Proceso tipo D – Gun Spray 17
Figura 13. Esquema de proceso de Rociado tipo APS 17
Figura 14. Proceso de Rociado VPS – (LPPS) – Sulzer Metco.....18
Figura 15. Proceso de Rociado en Frío (Cold Spray). 18
Figura 16. Esquema de proceso rociado térmico 20
Figura 17. Diseño del proceso para la obtención del material base o sustrato.....22
Figura 18. Espectrómetro *"Baird Spectrovac 1000"* 23
Figura 19. Diseño del proceso para establecer la composición química y microestructural del material base 24
Figura 20. Diseño del proceso metalográfico. 27
Figura 21. Proceso para ataque y microscopía. 31
Figura 22. Parámetros de la deposición por Arc Jet.....33
Figura 23. Proceso de aplicación para recubrimientos duros 35
Figura 24. Proceso para el ensayo de desgaste abrasivo por procedimiento C.....38
Figura 25. Proceso para el ensayo de microdureza Vickers y medición de altura por desgaste.....40
Figura 26. Captura M.O.I. 42
Figura 27. Captura M.O.I. – M.E.B. 43
Figura 28. Captura M.O.I. – M.E.B. 45

Figura 29. Captura M.O.I. – M.E.B. 46
Figura 30. Captura M.O.I. – M.E.B. 48
Figura 31. M.E.B. 49
Figura 32. M.E.B. 50
Figura 33. Muestra para el ensayo de microdureza Vickers de los tres mejores recubrimientos.....55
Figura 34. Gráfica de variabilidad 60T 57
Figura 35. Escala de variabilidad amplia 60T_Matlab.....57
Figura 36. Gráfica de variabilidad 75B + 60T 59
Figura 37. Escala de variabilidad amplia 75B + 60T_Matlab 59
Figura 38. Gráfica de variabilidad 75B + 140/60T 61
Figura 39. Escala de variabilidad amplia 75B + 140/60T_Matlab.....61
Figura 40. Gráfica de variabilidad sustrato 63
Figura 41. Recubrimiento duro - M.O.I.....63
Figura 42. Alto de recubrimiento 200x_308um.....64
Figura 43. Alto de recubrimiento 400x_74um.....64

Anexos

Anexo 1. *Información específica del espectrómetro utilizado*.....71
Anexo 2. *Certificado de conformidad ARGON GAS UAP GRADO 5.0*.....72
Anexo 3. *Bloque patrón para calibración del software espectrométrico: BCS/SS-CRM No. 465/1_Acero inoxidable AISI 304*.....73
Anexo 4. *Datos obtenidos por el software del espectrómetro*.....74
Anexo 5. *Tabla de tiempos para el encapsulado de probetas*.....74
Anexo 6. *Espectrómetro "BAIRD Spectrovac 1000"*s.....75
Anexo 7. *Cortadora de Precisión "BUEHELER – Isomet 1000 – precisión SAW"*.....75
Anexo 8. *Encapsuladora de Probetas "BUEHELER – Simplimet – mounting press"*.....75
Anexo 9. *Pulidora Manual "BUEHELER – Handimet 2 Roll Grinder"*.....76
Anexo 10. P*ulidora Automática "BUEHELER – Metaserv 250 – Grinder Pousher"*.....76
Anexo 11. *Balanza de Exactitud "METTLER TOLEDO MS"*.....76
Anexo 12. *Fume Hood "BIOBASE FH1200(p)*.....77
Anexo 13. *Limpiador Ultrasónico "BUEHLER UltraMet 2002"*.....77
Anexo 14. *Microscopio Óptico Invertido "NIKON ECLIPSE MA 100"*.....77
Anexo 15. *Microscopio Electrónico de Barrido "JEOL JSM-IT300LA"*.....77
Anexo 16. *Thermal Spray "TAFA Model 8830 Arc Spray Gun Operator's Manual, UPS"*.78
Anexo 17. *Microdurómetro Vickers "Wilson Hardness 432SVD"*.....78
Anexo 18. *Equipo para ensayo de desgaste abrasivo* 79
Anexo 19. *Alambre "Praxair and TAFA Arc Spray 13% Chrome Steel Wire - 60T"* 79
Anexo 20. *Alambre "Praxair and TAFA Arc Spray BondArc® Wire75B®"*.....82
Anexo 21. *Alambre "Praxair and TAFA 140 MXC^{TM} Nano Composite Wire"*.....84
Anexo 22. *Patrón del indentador*.....86
Anexo 23. *Registro fotográfico microdureza Vickers, muestra 1, 2, 3 y 4*.....87

Recubrimiento de una Capa Dura en una Aleación de Acero Inoxidable AISI 304 para mejorar su resistencia al desgaste.

1. Introducción

A principios del siglo XX se ha venido estudiando los aceros inoxidables austeníticos, quien su inventor fue Harry Brearley, nacido en Sheffield, Inglaterra. Es una aleación relativamente joven, que contiene hierro, carbono, cromo, manganeso, entre otros; cuyas cualidades estéticas y de mantenimiento lo han convertido en sinónimo de construcción moderna. En la industria existe una gran diversidad de maquinaria y componentes mecánicos que están expuestos a condiciones agresivas debido al trabajo que realizan, como, corrosión, desgaste, fatiga, entre otros. Cada día se trata de extender la vida útil de los sistemas mecánicos que se encuentran al servicio del hombre, al mejorar su eficiencia y rendimiento. En la búsqueda de mejorar estas condiciones, surgen técnicas para producir una superficie dura y resistente al desgaste sobre un núcleo tenaz (Jiménez, 2013).

La proyección térmica por arco eléctrico es una de las técnicas más económicas para aplicar recubrimientos metálicos resistentes a la corrosión con buena calidad en cuanto a adherencia y composición química. Los bajos costos energéticos y las altas tasas de producción la hacen una técnica competitiva respecto a otros sistemas de proyección, como llama y plasma. Adicionalmente, los parámetros en el sistema de proyección por arco (voltaje, corriente, presión del aire y distancia de proyección) pueden ser optimizados para aplicaciones específicas (Rojas, 2012). Esta lógica ha llevado al rápido desarrollo de la tecnología de revestimientos para uso como parte integrante del proyecto en diversas aplicaciones de ingeniería (Isaza, Marulanda y Zapata, 2007).

El material de revestimiento puede estar en forma de polvo, barra, cordón o alambre. Para la deposición de los recubrimientos se utilizan pistolas, que generan la cantidad de calor necesaria para fundir el material y acelerarlo hacia el sustrato por medio de gas comprimido, luego las partículas chocan contra la superficie formando capas delgadas que se conforman y adhieren a las irregularidades de la superficie (Coronado y Muñoz, 2007).

Las barreras térmicas son un claro ejemplo de recubrimiento obtenido mediante la técnica de proyección térmica (Jones, 1996). Suelen estar compuestas por una capa de anclaje que mejora la adherencia de los recubrimientos y evita la oxidación del substrato a las elevadas temperaturas de trabajo y de una capa cerámica con un bajo coeficiente de conductividad térmica que minimiza la transmisión de calor (Armada, Climent y Guilemany, 2001).

Hultman (2001) y Sundgren (2001), definen que estos materiales han logrado captar la atención, debido a su alta dureza y alta estabilidad química. La alta dureza en combinación con un bajo coeficiente de fricción disminuye la velocidad de desgaste abrasivo de la pieza recubierta, mientras la estabilidad química disminuye la interacción química entre la pieza recubierta y el medio de trabajo.
Para mejorar las propiedades de un material, parte desde las condiciones a las que se encuentra sometido, hasta un alto estudio por medio de métodos avanzados; de esta manera cada vez surgen nuevas técnicas tecnológicas que extienden la vida útil de sistemas mecánicos y garantizan un mejor trabajo.

2. Planteamiento del problema

Los antecedentes plantean el historial de la empresa donde se fabrican los elementos que posteriormente serán analizados al realizar el recubrimiento duro, se plantea también la importancia y alcances de la tecnología aplicada y se delimita su campo de aplicación.

2.1. Antecedentes

La Constructora Mejía se fundó en 1985 como Compañía Limitada y su desarrollo en 25 años ha sido como fabricante de maquinarias hasta combinar en la actualidad la fundición de distintos metales.

Con el advenimiento de la revolución industrial, la fundición de distintos tipos de acero a gran, mediana y pequeña escala, se convirtieron en una necesidad apremiante, así nacieron las grandes industrias siderúrgicas y metalúrgicas (De la Torre, Gonzáles y Saavedra, 2009).

Las necesidades inherentes al desarrollo de nuestro país (Ecuador), exigían una respuesta apropiada a la demanda de la industria de la construcción, de esta forma han surgido varias investigaciones en base a aleaciones con distintos porcentajes de carbono, recubrimiento de capas en cuanto a propiedades mecánicas y químicas; y optimización en equipos de alta tecnología para comprender la estructura del material. Estudios recientes de aceros austeníticos bajo la norma ASTM A128 son desarrollados para mejorar sus propiedades mecánicas la alta resistencia a la tracción y compresión, alta ductilidad y resistencia al desgaste.

En trabajos realizados en fundición por parte de la Constructora Mejía, los aceros inoxidables AISI 304 presentaron problemas de desgaste y dureza en algunas de sus aplicaciones.

2.2. Problema general

- ¿Existe un recubrimiento de una capa dura en una aleación de acero inoxidable 304 que mejore su resistencia al desgaste?

2.3. Problemas específicos

- ¿Se puede establecer la composición química y microestructural del material base?
- ¿Se puede encontrar los parámetros óptimos para un recubrimiento duro sobre un material base en la máquina Thermal Spray?
- ¿Se puede determinar el desgaste de recubrimiento duro en la aleación de acero inoxidable 304?

2.4. Importancia y alcances

Este proyecto es de gran impacto en el sector industrial, debido a que los aceros inoxidables austeníticos son muy utilizados por su alto contenido de carbono, esto genera que sus propiedades mecánicas sean favorables. Sin embargo, se han producido fallas inesperadas en equipos y máquinas en determinadas condiciones de servicio, siendo una de las causas principales su desgaste y corrosión cuando se encuentra en contacto con diferentes ambientes de trabajo y soluciones corrosivas.

El proyecto técnico impulsa investigar sobre la aplicación de recubrimientos con capa dura en una aleación de acero inoxidable AISI 304, para mejorar su resistencia al desgaste y rendimiento de trabajo dentro del sector industrial.

Actualmente, la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, cuenta con un amplio laboratorio especializado para recubrimiento y tratamiento superficial en aleaciones, además con un laboratorio metalográfico que determina la estructura del material.
Es importante añadir que la empresa "Constructora Mejía" es la beneficiaria directa, ya que el análisis parte de probetas obtenidas en su fundición que luego son mecanizadas, para posteriormente realizar varias pruebas espectrométricas dentro de su laboratorio, permitiendo precisar los porcentajes de cada elemento químico dentro de ellas.

2.5. Delimitación

Este trabajo de titulación se realizó dentro de tres establecimientos que son: la Constructora Mejía ubicada en Paseo Milchichig, quien facilitará las muestras obtenidas junto a su laboratorio de espectrometría hasta obtener y promediar la composición real del material base. La Universidad Politécnica Salesiana, donde se ejecutó la proyección térmica en la máquina Thermal Spray. Finalmente, la Universidad San Francisco de Quito, quien colaboró con su avanzado laboratorio de metalografía para análisis metalográficos, ensayos de desgaste y microdureza.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Colocar un recubrimiento de una capa dura en una aleación de acero inoxidable AISI 304 para mejorar su resistencia al desgaste.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer la composición química y microestructural del material base.
- Encontrar los parámetros óptimos del equipo Thermo-Spray para un recubrimiento duro sobre un material base.
- Determinar el desgaste de recubrimiento duro sobre la aleación de acero inoxidable AISI 304.

4. Matriz de consistencia

En la matriz de consistencia se muestra el problema general y específicos junto a los objetivos que se derivan de los mismos considerando los indicadores que me permiten indicar si los objetivos específicos y general se han cumplido según la propuesta de la investigación. Además, indica el marco teórico necesario para poder tener el conocimiento adecuado que permite realizar la presente investigación.

4. Matriz de consistencia

Problema General	**Objetivo General**	**Indicadores**	**Marco Teórico**
¿Existe un recubrimiento de una capa dura en una aleación inoxidable 304 que mejore su resistencia al desgaste?	Colocar un recubrimiento de una capa dura en una aleación de acero inoxidable 304 para mejorar su resistencia al desgaste.	-Resistencia al desgaste del recubrimiento duro.	1. Acero inoxidable. 1.1. Acero inoxidable austenítico. 2. Maquinaria industrial. 3. Recubrimiento duro. 3.1. Materiales usados como recubrimiento duro.
Problemas Específicos	**Objetivos Específicos**		
1. ¿Se puede establecer la composición química y microestructural del material base?	1. Establecer la composición química y microestructural del material base.	-Composición química del material base y su microestructura.	4. Sustrato (material base). 5. Espectrometría de masas. 6. Desgaste. 6.1. Desgaste abrasivo. 6.2. Desgaste adhesivo. 6.3. Desgaste por corrosión. 6.4. Desgaste por fatiga.
2. ¿Se puede encontrar los parámetros óptimos para un recubrimiento duro sobre un material base en la máquina Thermal Spray?	2. Encontrar los parámetros óptimos del equipo Thermo-Spray para un recubrimiento duro sobre un material base.	-Distancia de la antorcha y de pulverización. -Ángulo de la antorcha. -Temperatura y voltaje del arco eléctrico. -Variación de energía eléctrica. -Velocidad de proyección de partículas. -Caudal y presión del gas.	7. Metalografía. 8. Rociado térmico (Thermal Spray). 9. Técnicas de proyección térmica. 9.1. Proceso de llama/alambre.
3. ¿Se puede determinar el desgaste de recubrimiento duro en la aleación de acero inoxidable 304?	3. Determinar el desgaste de recubrimiento duro sobre la aleación de acero inoxidable 304.	-Ensayo por desgaste abrasivo -Ensayo de microdureza Vickers sobre cada recubrimiento. -Medición de altura por desgaste.	10. Parámetros del proceso. 10.1. Proceso de proyección. 10.2. Materiales. 10.3. Propiedades de recubrimiento. 10.4. Otros.

5. Marco teórico

5.1. Acero inoxidable

El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión, dado que el cromo u otros metales aleantes, poseen gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro (Kalpakjian y Schmid, 2002).

Además del cromo típicamente otros elementos de aleación en los aceros inoxidables son el níquel, molibdeno, cobre, titanio, silicio, manganeso, colombio, aluminio, nitrógeno y azufre. Se utiliza la L para identificar los aceros inoxidables de bajo carbono. Mientras más elevado sea el contenido de carbono, menor será la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. (Kalpakjian y Schmid, 2002).

Tabla 1. – Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidables recocidos seleccionados. **Fuente:** (Kalpakjian y Schmid, 2002).

AISI (UNS)	Resistencia tensil máxima (Mpa)	Resistencia a la cedencia (Mpa)	Elongación en 50 mm (%)	Características y aplicaciones típicas
303 (S30400)	550-620	240-260	53-50	Productos de máquinas de roscar, flechas, válvulas, pernos, bujes y tuercas; acoplamientos para aeronaves; pernos; tuercas; remaches, tornillos; prisioneros.
304 (S31600)	565-620	240-290	60-55	Equipo químico de procesamiento de alimentos, equipo para cervecerías, recipientes criogénicos, canalones, tubos de descenso, botaguas.
316 (S41000)	550-590	210-290	60-55	Elevada resistencia a la corrosión y alta resistencia de cedencia. Equipo para manejar productos químicos y pulpas, equipo fotográfico, cubas para Randy, piezas de fertilizantes, marmitas de cocción de la salsa de tomate (catsup) y tinas de fermentación
410 (S30300)	480-520	240-310	35-25	Piezas para maquinaria, flechas de bombas, pernos, bujes, rampas para carbón, cuchillería, implementos de pesca, herrajes, piezas de motor a chorro, maquinaria para la industria minera, cañones para rifles, tornillos y válvulas.
416 (S41600)	480-520	275	30-20	Acoplamientos para aeronaves, pernos, tuercas, insertos para extintores de incendio, remaches y tornillos.

5.1.1. Acero Inoxidable Austenítico

Los aceros inoxidables austeníticos son ampliamente usados en implantes biomédicos y en elementos de máquinas de la industria de alimentos y petroquímica, gracias a su alta resistencia a la corrosión (Romero, 2017). Investigaciones previas han sido realizadas en tribómetros tipo espiga sobre disco a diferentes niveles cargas, velocidades y distancias de deslizamiento (Straffelini, Molinari y Trabucco, 2002).
Sin embargo, aún no se conocen suficientemente algunas de sus propiedades o comportamientos ante las solicitaciones tribológicas, empleando un tribómetro tipo bola sobre anillo, siendo esta necesaria para desarrollar diseños de dispositivos óptimos en su durabilidad bajo condiciones de contacto no concordante (Romero, 2017).

5.2 Maquinaria Industrial

Hunt K. H. (1978) define un mecanismo como un medio de transmisión, control o restricción del movimiento relativo. Una máquina, en general, contiene mecanismos que están diseñados para producir y transmitir fuerzas significativas.

Las máquinas y mecanismos fueron ideados desde el amanecer de la historia. Los antiguos egipcios idearon máquinas primitivas para la construcción de las pirámides y otros monumentos. Aunque los egipcios del Imperio antiguo no conocían la rueda y la polea (montadas en un eje), utilizaron la palanca, el plano inclinado (o cuña) y probablemente el rodador de troncos. La rueda y el eje definitivamente no eran conocidos. Su primera aparición quizás ocurrió en Mesopotamia alrededor de 3000 a 4000 a.C (Norton, 2009).

La maquinaria industrial se utiliza por empresas, fábricas o talleres dependiendo de la actividad a la que se dediquen. Pueden ser, industrias mecánicas, mercantiles, textiles, alimenticias, metalúrgicas, automotrices, etc. El uso de este tipo de maquinaria hace que los trabajos se logren hacer en grandes cantidades, algo que no podría realizarse únicamente con la mano de obra de hombre. Aunque no por ello puede prescindirse de la ayuda humana, pues sumamente necesaria para la correcta operación de cualquier tipo de maquinaria y para su mantenimiento.

5.3 Recubrimiento Duro

Los recubrimientos duros son aleaciones que tienen como propiedad principal la resistencia al desgaste y se les llama duros porque poseen alta dureza. La técnica utilizada para la aplicación del recubrimiento duro en la superficie de un componente con bajas propiedades de desgaste se le conoce como "Hardfacing" (Colombier y Hochmann, 1965).

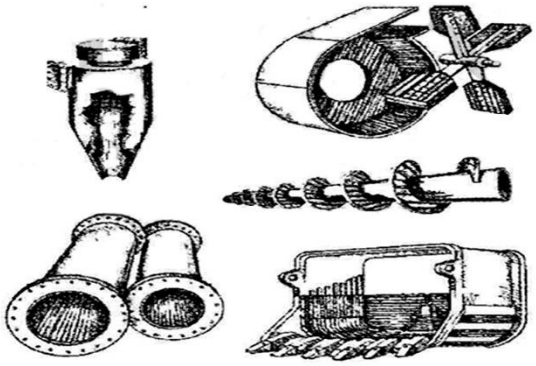


Figura 1. – Aplicación de recubrimientos duros en componentes metálicos. **Fuente:** (Colombier y Hochmann, 1965).

5.3.1 Materiales usados como recubrimientos duros

Por comodidad, sería conveniente tener un material que presentada buena resistencia a todos los diferentes tipos de desgaste. Sin embargo, la complejidad del medio, aunado a las consideraciones económicas, han impulsado el desarrollo de un gran número de materiales usados como recubrimientos duros. Además de los costos de producción se ha necesitado desarrollar un gran número de métodos de deposición y formación de productos (varillas desnudas, electrodos revestidos, polvos, alambres, etc.).
La selección de un recubrimiento duro apropiado se logra a través de un análisis cuidadoso de las condiciones de servicio. También se debe lograr un balance entre propiedades de desgaste, resistencia del medio ambiente y buena soldabilidad.

Los recubrimientos duros incluyen una gran variedad de aleaciones, cerámicos y combinaciones de ambos materiales. Normalmente las aleaciones metálicas de los recubrimientos duros se clasifican como: aceros o materiales ferrosos de baja aleación, hierros blancos con alto contenido de cromo o materiales ferrosos de alta aleación, aleaciones base níquel y aleaciones base cobalto (Rodríguez, 2001).

5.4 Sustrato (material base)

La limpieza y preparación de la superficie a revestir es de gran importancia ya que ésta se fundirá durante la aplicación del recubrimiento y algún elemento extraño al material puede afectar las propiedades del componente. Sin embargo, la composición química del metal base, el intervalo de temperaturas de fusión y las características de expansión térmica tienen un efecto significativo en la selección del proceso. Para el proceso de aplicación del recubrimiento duro se requiere que la temperatura de fusión del metal base sea más alta o igual a la de la aleación del mismo. Aunque en otros procesos como el rociado no se necesita esta condición.
Las características de expansión térmica y contracción del metal base afectan la

deformación por solidificación. Frecuentemente la pieza de trabajo tiene que calentarse uniformemente para que las altas temperaturas de soldadura permitan una depositación del recubrimiento libre de grietas. Al fundir el material sea cual sea su composición, se toma una pequeña muestra en un molde aparte siguiendo su proceso normal de tratamiento térmico y posteriormente de mecanizado. Dentro de una fundidora esta muestra es conocida como metal base o probeta, la cual se coloca en un espectrómetro que determina el porcentaje de sus componentes (Rodríguez, 2001).

5.5 Espectrometría de masas

La espectrometría de masas permite identificar una sustancia en una muestra, rápidamente, sobre la base de su masa. Esta técnica ha sido utilizada por los químicos en moléculas pequeñas y medianas. El método es tan sensible que es posible rastrear cantidades muy pequeñas de cada tipo de molécula (Fenn, Tanaka y Wüthrich, 2002).

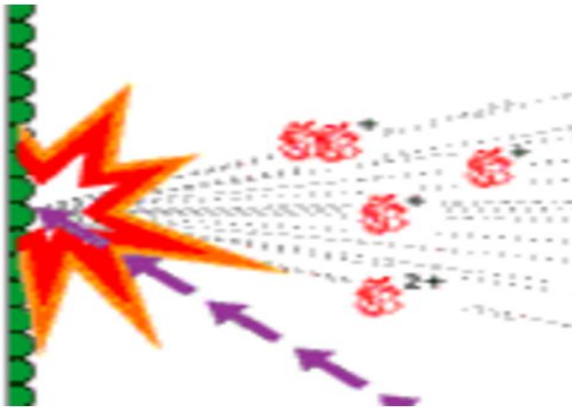


Figura 2. – Principios para la espectrometría de masas de biomoléculas. **Fuente:** (Fenn, Tanaka y Wüthrich, 2002).

Recientemente, esta técnica se utiliza no sólo en investigación, sino también en análisis de rutina de los procesos industriales, en control de calidad, etc (Gutiérrez y Droguet, 2002). Sus principales cualidades son:

- Capacidad de identificación de forma prácticamente inequívoca, ya que proporciona un espectro característico de cada molécula.
- Cuantitativa: permite medir la concentración de las sustancias.
- Gran sensibilidad: habitualmente se detectan concentraciones del orden de ppm o ppb y en casos específicos se puede llegar hasta ppt e incluso ppq.
- Universal y específica.
- Proporciona información estructural sobre la molécula analizada.
- Suministra información isotópica.

- Es una técnica rápida: se puede realizar un espectro en décimas de segundo, por lo que puede monitorizarse para obtener información en tiempo real sobre la composición de una mezcla de gases.

Dentro del espectrómetro de masas, se procede a la ionización de la muestra mediante diferentes métodos. El sistema de ionización más frecuente es el de impacto electrónico que bombardea las moléculas con electrones de una cierta energía, capaces de provocar la emisión estimulada de un electrón de las moléculas y así ionizarlas (Gutiérrez y Droguet, 2002).

5.6 Desgaste

El desgaste es un desprendimiento gradual de partículas de la superficie de un material sólido, por fricción con otro sólido, o por contacto con un líquido o gas en movimiento.
El desgaste no se considera como una propiedad inherente del material puesto que sólo se produce por la interacción de dos cuerpos en contacto y en movimiento y está determinado, en gran parte, por condiciones externas independientes de la naturaleza del material (León, 2003).
Una de las clasificaciones más simples del desgaste está basada en la presencia o ausencia de lubricantes efectivos en el tribosistema: desgaste lubricado y desgaste no lubricado. Sin embargo, el método convencional para clasificar los procesos de desgaste se apoya en la descripción física de los mismos, con los mecanismos de desgaste como rasgo distintivo (Zum y Heinz, 1987).

- Desgaste abrasivo
- Desgaste adhesivo
- Desgaste por corrosión
- Desgaste por fatiga

5.6.1 Desgaste abrasivo

Según la definición de la ASTM, el desgaste abrasivo es aquel originado por partículas o protuberancias duras que son forzadas en contra de una superficie sólida mientras se mueven a través de ella. La abrasión puede ocurrir cuando una superficie dura y rugosa desliza sobre otra superficie más blanda, formando una serie de surcos y desprendiendo material en forma de partículas sueltas (Vol. 03.02 ASTM, 1987).

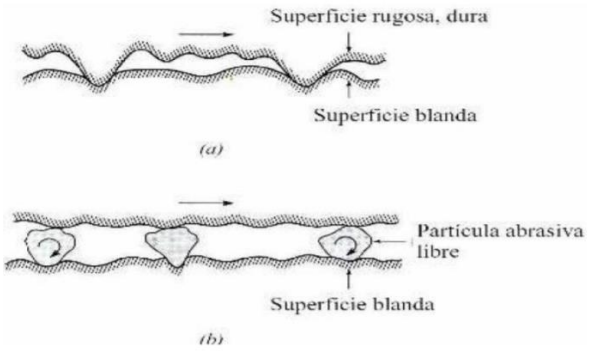


Figura 3. – Ilustración de dos formas de desgaste abrasivo: (a) una superficie áspera y dura deslizando sobre una superficie más blanda y (b) partículas abrasivas libres (tercer cuerpo) atrapadas entre las superficies. **Fuente:** (Gómez, 2009).

5.6.2 Desgaste adhesivo

Con respecto al desgaste adhesivo, el papel principal lo juega la interacción entre las superficies y su grado de limpieza, es decir, cuando el acercamiento entre los cuerpos es tal, que no se presenta ningún tipo de impurezas, capas de óxido o suciedades, se permite que el área de contacto sea aumentada, pudiéndose formar uniones adhesivas más resistentes (Ávila, 2015).

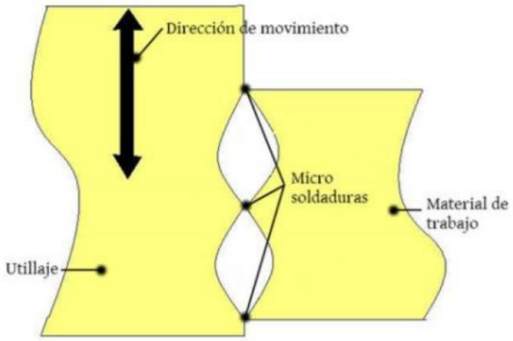


Figura 4. – Desgaste adhesivo. **Fuente:** (Ávila, 2015).

5.6.3 Desgaste por corrosión

La corrosión es el resultado destructivo por una reacción química o electroquímica entre un metal o aleación y su medio ambiente, en donde los átomos metálicos pasan a compuestos químicos o minerales, ya que la corrosión es la tendencia que tienen los metales a volver al estado combinado, es decir, al mismo estado en que se encontraban en la naturaleza, que es, en términos termodinámicos, el estado más estable (Isaza, Marulanda y Zapata, 2007).

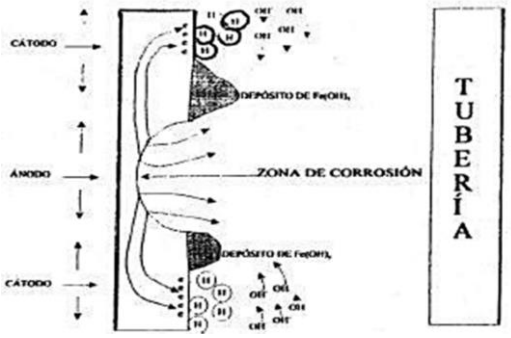


Figura 5. – Corrosión electroquímica. **Fuente:** (Santander, 2008).

5.6.4 Desgaste por fatiga

Este mecanismo de desgaste es observado en caso de rodadura y/o deslizamiento, de una superficie respecto a otra. Esto se produce sobre un punto cualquiera del camino de rodadura la aplicación de cargas variables en el tiempo que inducen tensiones capaces de nuclear y propagar fisuras por fatiga (pequeñas fisuras superficiales y/o sub-superficiales) (Herrera, 2015).

Figura 6. – Desgaste por fatiga entre dos superficies en deslizamiento. **Fuente:** (Gómez, 2009).

5.7 Metalografía

La metalografía es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas. Mucha es la información que puede suministrar un examen metalográfico, el mismo que utiliza como principal instrumento, el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra o probeta, con aumentos que varían entre 50 y 2000 (UPS, 2011).

5.8 Rociado Térmico (Thermal Spray)

El rociado térmico tiende a prolongar la vida útil de los bienes, al obtener un rendimiento aceptable de los mismos durante más tiempo y a reducir el número de fallas. Este proceso aumenta las propiedades finales de la pieza dándole una mayor solidez, conductividad, resistencia a la corrosión o disminuyendo costos, que los de un metal o aleación uniforme.
Los revestimientos rociados térmicamente son formados por depósitos de sucesivas capas de góticas líquidas (millones de partículas por cm^2/seg) que se aplanan y solidifican, resultando una macroestructura conocida como lenticular o laminar, debido al impacto de

las partículas calentadas y aceleradas sobre el substrato, estas se aplanan en forma de pequeñas lentes. A lo que inciden sobre el substrato, esas pequeñas góticas en forma de lentes se enfrían a velocidades extremadamente altas y se anclan mecánicamente en las irregularidades de la superficie. La estructura típica de revestimientos rociados térmicamente es la unión cohesiva consolidada de láminas del material rociado, entremezclada con inclusiones de óxidos, microgrietas, partículas sólidas y porosidad (Gamboa, Marulanda y Posada, 2007).

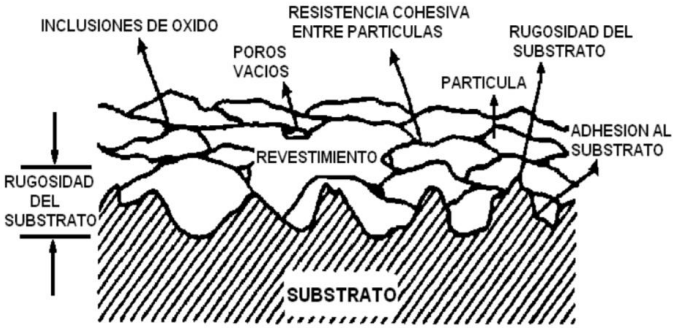


Figura 7. – Estructura típica de un revestimiento rociado térmicamente. **Fuente:** (Marulanda, 2007).

5.9 Técnicas de Proyección Térmica

Las variantes de esta familia de procesos están determinadas por las fuentes de energía utilizadas para conformar el recubrimiento como producto final (Pagnola, 2009).

Tabla 2. – Distintas técnicas de T.S. agrupadas de acuerdo con el tipo de fuente de energía empleado. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

Tipo de Energía				
Tipo	**Energía cinética**	**Combustión**	**Plasma**	**Arco eléctrico**
Baja velocidad		Llama / Alambre	V.P.S. (Vacuum Plasma Spray) o L.P.P.S (Low Pressure Plasma Spray)	En atmósfera controlada
		Llama / Polvo		En atmósfera inerte
Alta velocidad	Cold spray	H.V.O.F (High Velocity Oxy-Fuel Spray)	A.P.S. (Air Plasma Spray) C.A.P.S. (Controlled-Atmosphere Plasma Spray)	
		D.G.S (Detonation-Gun Spray)		

El concepto básico que abarca a esta familia de procesos es el rociado de partículas del recubrimiento (por flama, plasma o arco eléctrico) a través de una boquilla especialmente diseñada para cada técnica. Y obtener con esto un acabado superficial óptimo según el requerimiento (Pagnola, 2009).

5.9.1 Proceso de Llama/Alambre

La función primaria de la llama en este proceso es fundir el material de aporte provisto en forma de alambre. Luego una corriente de aire atomiza el material fundido y es proyectado hacia la pieza base. Las tasas de proyectado están en el rango de 0.5 - 9 Kg/h para el acero inoxidable (Pagnola, 2009).

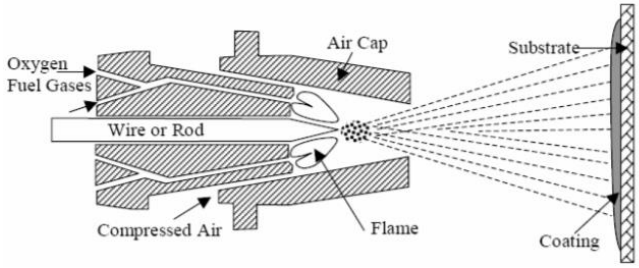


Figura 8. – Proceso de rociado por Llama-Alambre. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

5.9.2 Proceso de Llama/Polvo

El material en polvo es aspirado dentro de la flama oxígeno-combustible, fundido y llevado por el flujo turbulento generado en el jet de la boquilla hasta la pieza de trabajo. La velocidad de las partículas es relativamente baja (menor a 100 m/s) y la fuerza cohesiva entre las capas de los depósitos es inferior que en los procesos de alta velocidad. Esta técnica tiene una alta porosidad y posee tasas de proyección que varían entre 0.5 – 9 Kg/h. La temperatura superficial del sustrato puede ser alta pues la llama lo alcanza (Pagnola, 2009).

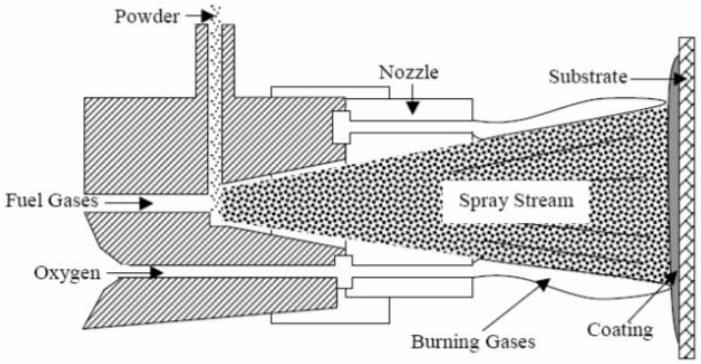


Figura 9. – Proceso de Rociado por Llama-Polvo. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

5.9.3 Proceso de Combustible-Oxígeno de Alta Velocidad (HVOF)

Este proceso involucra la mezcla de un gas combustible (hidrógeno, propano o propileno), con oxígeno para crear un jet de combustión a temperaturas de 2500 a 3000 ºC. La combustión toma lugar a muy alta presión en una cámara que posee un diámetro de salida de 8 a 9 mm. Esta origina un jet de gas supersónico e imprime alta velocidad a las partículas a depositar. El tipo de flama HVOF es prácticamente recta, a diferencia de los procesos de baja velocidad donde es cónica (Pagnola, 2009).

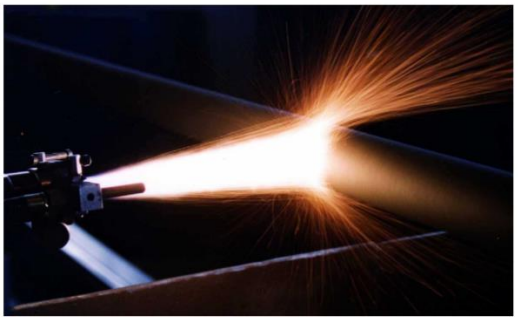


Figura 10. – Proceso de Rociado por flama. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

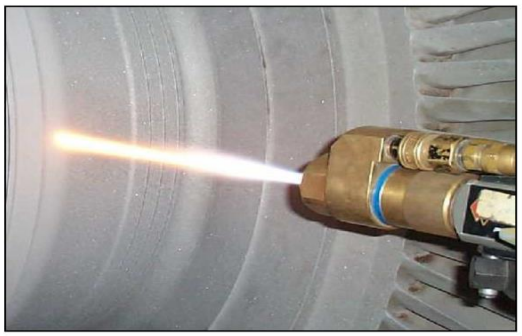


Figura 11. – Proceso de HVOF – Jet Kote. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

5.9.4 Proceso de Rociado por Pistola de Detonación

El proceso DGS (Detonación Gun Spray), está basado en la inyección del polvo del recubrimiento dentro de una cámara denominada cañón. Allí la mezcla de oxígeno y gas combustible (generalmente acetileno) es detonada por una chispa proveniente de una bujía produciéndose una explosión controlada. Esta explosión provoca ondas de choque que se propagan a lo largo del cañón arrastrando las partículas de polvo a velocidades subsónicas del orden de 800 m/s y a temperaturas y presiones del orden de 4500 ºC y 1 MPa respectivamente (Pagnola, 2009).

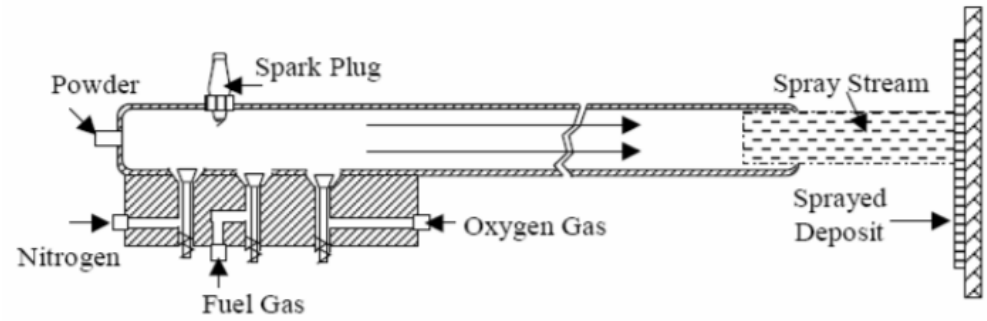


Figura 12. – Proceso tipo D – Gun Spray. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

5.9.5 Proceso de Rociado por Plasma en Aire APS

El proceso APS (Air Plasma Spray) consiste en la proyección convencional en aire a muy alta temperatura. El proceso térmico alcanza, en las corrientes gaseosas en un rango de 6000 a 15000 ºC. Luego, las partículas de polvo son introducidas en la cámara de proyección por otro gas que le provee aceleración hasta alcanzar velocidades de 600 m/s dentro del jet (Pagnola, 2009).

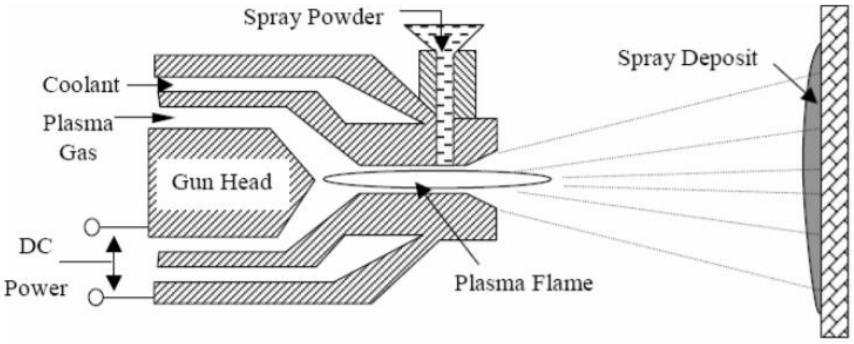


Figura 13. – Esquema de proceso de Rociado tipo APS. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

5.9.6 Proceso de Rociado por Plasma en Vacío VPS

La técnica VPS (Vacuum Plasma Spraying) es conocida también como Rociado por Plasma a Baja Presión LPPS (Low Pressure Plasma Spraying), y utiliza boquillas de APS modificadas dentro de una cámara a presiones en un rango de 10 a 50 kPa. La velocidad alcanzada por las partículas proyectadas es del orden de los 1000 m/s. Esto altera las propiedades mecánicas del depósito, incrementando la fuerza de cohesión y reduciendo la porosidad (Pagnola, 2009).

Figura 14. – Proceso de Rociado VPS – (LPPS) – Sulzer Metco. **Fuente:** (Pagnola, 2009).

5.9.7 Proceso por Rociado en Frío

La deposición del material se realiza llevando al extremo la velocidad de rociado de las partículas, a más de 1500 m/s con gas nitrógeno o helio como gas de proceso; a temperaturas bajas en el orden de 800 ºC. El gas de proceso es alimentado a través de una unidad de calentamiento a la pistola donde sale a través de boquillas especiales, arrastrando a las partículas (en estado sólido y relativamente frías) para la proyección directa sobre la superficie de trabajo. Este procedimiento evita la oxidación y la contracción del material, manteniendo las composiciones originales de los polvos (Pagnola, 2009).

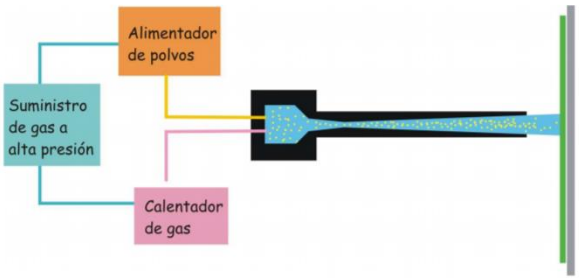


Figura 15. – Proceso de Rociado en Frío (Cold Spray). **Fuente:** (Pagnola, 2009).

5.10 Parámetros del proceso

5.10.1 Proceso de proyección

Los principales parámetros por controlar en cualquier proceso de proyección térmica son: la temperatura, el estado de fundición, la velocidad y la condición del sustrato; estos parámetros a su vez controlan la morfología del depósito formado. (Fincke, Swan, Bewley, Haggard, Gevelber y Wroblewski, 2001).

- La temperatura que puede alcanzar el proceso de proyección térmica por arco eléctrico es de 5000 °C. (Rojas, A., 2012).

- La velocidad de la proyección debe ser alta para que el material de recubrimiento llene los vacíos, aplane las partículas y cree una fuerte cohesión con el sustrato, sin llegar a generar fragmentación del recubrimiento; de esta manera el proceso presenta bajos niveles de porosidad (Rojas, A., 2012).

- En la proyección de alambre por arco eléctrico, el peso del recubrimiento que puede depositarse por unidad de tiempo está directamente relacionado con el amperaje de salida del sistema, la densidad y el punto de fusión del alambre. Cuanto mayor es la corriente nominal del sistema, por ejemplo, 350A, 700A etc.; mayor es la velocidad de pulverización (Rojas, A., 2012).

- El uso de aire comprimido para la atomización del material fundido da lugar a un alto contenido de oxígeno en el recubrimiento. Al aumentar la presión del aire de pulverización, se aumenta la velocidad de la corriente de gas, que a su vez rompe las partículas fundidas en gotas más pequeñas, estas gotas reaccionan más fácilmente con el oxígeno debido a su mayor área superficial (Rojas, A., 2012).

- El diseño de la boquilla de la pistola de pulverización tiene una fuerte influencia en la geometría de la pulverización, su dinámica y por ende en las propiedades del recubrimiento. Una modificación menor del diseño de la boquilla de la pistola de rociado mejora fuertemente las características del revestimiento (Rojas, A., 2012).

- La velocidad de proyección de las partículas puede variar entre un rango de 100 a 300 m/s (Gedzevicius y Valiulis, 2009).

5.10.2 Materiales

En la industria metalúrgica se funde sustratos, que, debido al trabajo a realizar, exigen ser recubiertos; estos son el acero, el cromo, manganeso y aleaciones.

Existe una amplia gama de materiales de recubrimiento para componentes expuestos a diferentes tipos de desgaste como: aleaciones metálicas, cerámicas, carburos y compuestos metálicos-orgánicos (Rojas, 2012).

En la figura 18, se observa el esquema de una aplicación por rociado térmico, en donde el sistema está compuesto por:

- Material por depositar: alambre, micro polvos metálicos, carburos, cerámicas y

polímeros.

- Unidad de proyección: fuente que incorpora el material a depositar.
- Fuente de energía: puede ser gases (oxígeno y acetileno), o a partir de energía eléctrica para producir arco o plasma (Cañas, Marulanda y Tristancho, 2009).

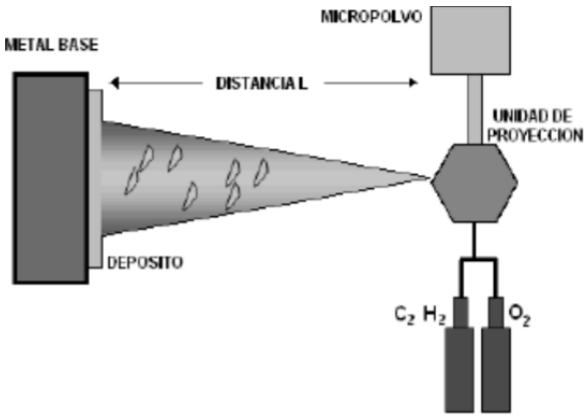


Figura 16. – . Esquema de proceso rociado térmico. **Fuente:** (Cañas, Marulanda y Tristancho, 2009).

5.10.3 Propiedades de recubrimiento

La resistencia de la unión a la tracción está en el intervalo de 10 a 30 MPa para Zn y recubrimientos de Al (Schmidt and Matthäus, 1980), pero puede alcanzar un valor de 70 MPa para los recubrimientos de NiAl o para NiCr + SiC compuestos pulverizaron utilizando Sonarc ™. La porosidad se encuentra en el intervalo de 10 a 20 %. Los espesores de los revestimientos están en la gama de 100 a 2000 μm (Álvarez y Cuji, 2017).

5.10.4 Otros

- Arco eléctrico: voltaje y amperaje.
- En cuanto a la atomización: presión, caudal, distancia y tipo de gas.
- La atmósfera pulverización es aire, pero se puede instalar una bomba de vacío a la antorcha, o atmósferas reactivas o inertes.
- Distancia de la boquilla.
- Tamaño de la boquilla.
- Temperatura de precalentamiento del material base (sustrato).
- Se puede aplicar un post-tratamiento de pulverización por recocido en unhorno, con el fin de mejorar la densidad y resistencia de unión del recubrimiento.

6. Marco Metodológico

Para poder determinar el tipo de recubrimiento con los parámetros involucrados en el proceso, la investigación que se va a realizar es de tipo experimental, debido a que, "se manipulan variables independientes para ver sus efectos sobre variables dependientes en una situación de control" (Baptista, Fernández y Hernández, 2014).

6.1 Metodología del proceso

Está constituido por datos e informaciones sobre el trabajo, de forma descriptiva, estadística y gráfica con el fin de documentar las actividades, así como las conclusiones de la evaluación y las propuestas de recomendación (UPS, 2011).

6.1.1. Obtención del material base o sustrato ("Constructora Mejía")

❖ **Proceso**

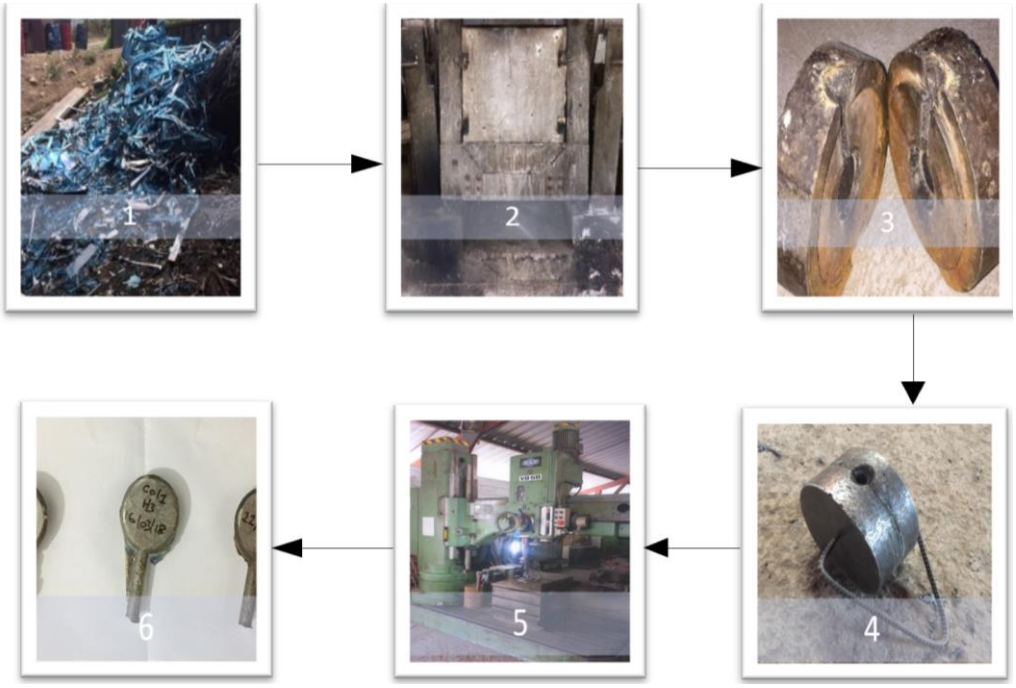
- La chatarra es la materia prima para la industria de la fundición, es decir para la elaboración de la colada; es todo desperdicio metálico, proveniente de embarcaciones navales, desperdicios de laminación, desguace y entre otras fuentes. Debe ser correctamente separada respecto al tipo de material (Villavicencio, 2014).

- El proceso de fusión de chatarra para la obtención del acero inoxidable AISI 304, se realizó algunas veces (requerimiento de clientes) en diferentes días donde se obtuvo tres probetas. La fundición se realizó en un horno eléctrico por inducción magnética a media frecuencia, de marca *"VIP Power-Trak 350-10",* a una temperatura entre 1.300º C y 1.400º C.

- Terminada la fusión, el acero líquido pasó a la cuchara de colada y se vertió en sus respectivos moldes de arena (cliente), adicional a dos especiales (ensayos espectrométricos y lingotes) para obtener la forma de probeta. Su enfriamiento se produce dentro del molde.

- Terminada la fusión, el acero líquido pasó a la cuchara de colada y se vertió en sus respectivos moldes de arena (cliente), adicional a uno especial (ensayos espectrométricos) para obtener la forma de probeta. Su enfriamiento se produce dentro del molde.

- Tras su solidificación, cada probeta se extrajo sólida para posteriormente ser mecanizadas en dos de sus caras con la finalidad de identificar su composición química y microestructural.



1. Identificación y separación de la chatarra respecto al tipo de material.
2. Fusión de la chatarra dentro del horno de inducción.
3. Derrame de la colada sobre los moldes (enfriamiento y extracción).
4. Enfriamiento lento y extracción del elemento sólido.
5. Mecanizado de dos caras opuestas de cada probeta.
6. Obtención de probetas.

Figura 17 – Diseño del proceso para la obtención del material base o sustrato. **Fuente:** Autor.

❖ Equipos

- Horno "VIP Power-Trak 350-10"
- Taladro Radial "KOVOSVIT V050"

❖ Materiales

- Chatarra (Cromo, níquel, carbono, molibdeno, manganeso, fósforo, azufre y silicio)
- Fundente
- Arena sílice

- Bentonita
- Refrigerante de mecanizado

6.1.2. Obtención de la composición química del material base ("Constructora Mejía")

La espectrometría de emisión óptica es el método más ampliamente aceptado para el análisis elemental de metales, y el espectrómetro *"Baird Spectrovac 1000"* es reconocido en todo el mundo como un instrumento líder para esta tecnología (IMO Industries, 1990) (Anexo 1).

Figura 18. – Espectrómetro *"Baird Spectrovac 1000"*. **Fuente:** (IMO Industries, 1990).

❖ **Proceso**

- El espectrómetro mencionado anteriormente, fue usado para identificar la composición química y microestructural del material base. Dentro de este equipo se encuentra una bomba que extrae el oxígeno de la cámara espectro, generando un vacío mediante gas argón con un 99.999% de pureza (Anexo 2); esto produce un alto voltaje que crea una pequeña chispa en la cara superior para identificar el porcentaje de cada elemento químico habiente.

- Se realizó también un mantenimiento de limpieza en la base de la cámara, donde se encuentra el electrodo que genera la chispa, ya que ahí es donde ocurre que manchas y partículas se acumulen sobre su filtro, orín y arandela. Para ello, la máquina cuenta con accesorios y técnicas específicas de limpieza. Este proceso tiene un alto grado de importancia porque garantiza que los datos obtenidos sean precisos.

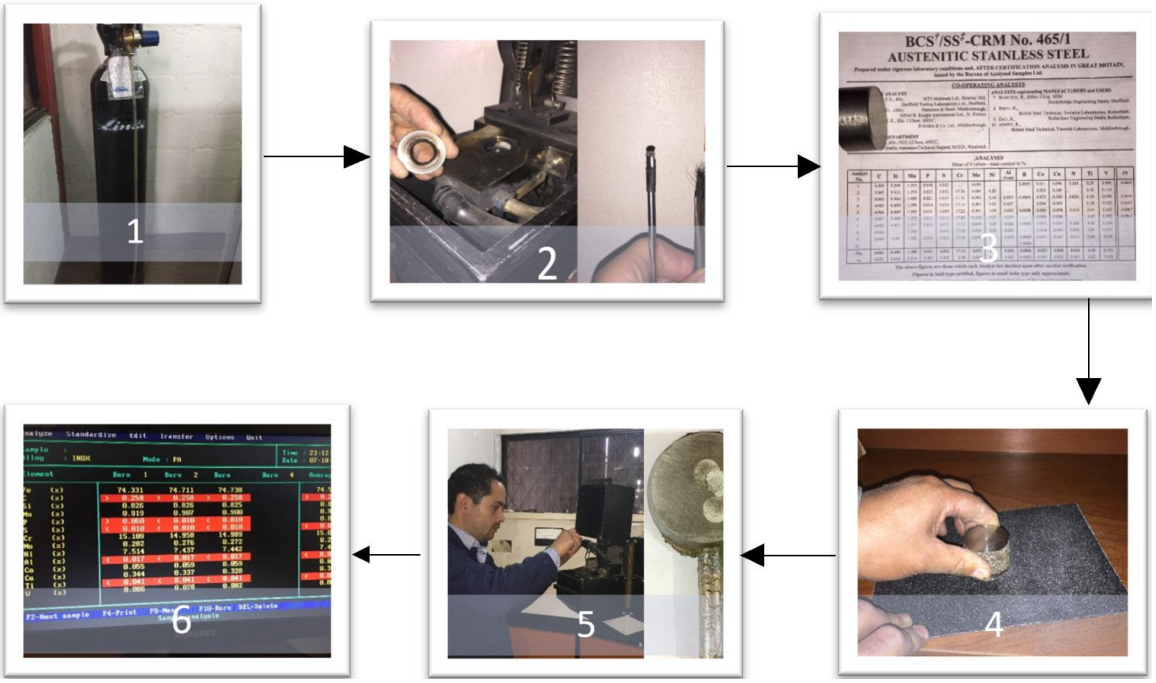
- En dos probetas no válidas se realizó la quema para extraer todo el oxígeno de la cámara, y de paso para calibrar la máquina.
  Para poner a punto su funcionamiento fue necesario ingresar los datos de porcentaje de cada elemento químico de un acero inoxidable AISI 304 en el

software de la máquina, analizando la hoja del bloque patrón: BCS/SS-CRM No. 465/1 (Anexo 3).

- Fue indispensable que la base de cada probeta se haya nivelado 100% respecto a su cara opuesta, con un grado de ralladura (lija #60), ya que el gas argón necesita circular por diminutas grietas para generar la chispa.

- En la cámara se ingresó cada probeta, luego se la cerró completamente hasta producir tres quemas en cada una de ellas. De esta manera se obtuvieron varios datos de porcentaje en sus elementos químicos habientes y al final se promedió a uno solo.

- Finalmente, el software determina el porcentaje en las tres quemas de cada probeta y muestra su resultado promedio (Anexo 4).



1. Encendido del equipo y verificación de cantidad de gas argón.
2. Limpieza de sistema interno de la cámara de espectro.
3. Calibración del equipo por medio de bloques patrón.
4. Verificación de paralelismo y lijado para formación de grietas.
5. Quema de cada probeta dentro de la cámara.
6. Obtención final de la composición química y microestructural.

Figura 19. – Diseño del proceso para establecer la composición química y microestructural del material base. **Fuente:** Autor.

- **Equipos**
  - Espectrómetro "BAIRD Spectrovac 1000"
- **Materiales**
  - Gas Argón "UAP grado 5.0"
  - Probetas quemadas (eliminación de gas)
  - Lija #60
  - Probeta AISI 304

6.1.3. Análisis metalográfico ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ)

Como es de conocimiento general, todo proceso de inspección o investigación se rige a una serie de normativas nacionales e internacionales que guían al correcto procedimiento de cada prueba, así como su repetividad o reproducibilidad, "El estudio entre laboratorios es el primer paso para obtener valores de contraste para la repetibilidad y reproducibilidad de un método de prueba. Es una manera de saber el comportamiento de un método de prueba cuando se realiza en diferentes situaciones" (AAAHC, 2013).

"Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens" (ASTM E3-01, 2001), describe que, para el desarrollo de esta metodología, las adecuadas técnicas para la preparación de muestras metalográficas y para lograr una recolección de datos correcta; tiene gran importancia el uso de la norma internacional ASTM E3-01.
La metodología propuesta presenta las características esenciales para conseguir la información necesaria y lograr los objetivos propuestos.

El desbaste se dio por terminado cuando se obtuvo una cara perfectamente plana, con rayas muy finas en toda la superficie y en un solo sentido, producidas por la lija de mayor finura. Mientras más blando es el material, mayor es la finura del grano del papel de esmeril utilizado en último término (UPS, 2011).

- **Proceso**

  - A partir del material mecanizado obtenido por fundición (75mm de largo x 15mm de diámetro - lingote), se dividieron en 12 muestras (5mm de alto x 15mm de diámetro) a través de una *Cortadora de Precisión* a velocidad de 600 rpm, con una fuerza constante de peso a 40gr y autorefrigerada (evita el calentamiento del material).

  - En la *Encapsuladora de Probetas* muy bien limpiada y precalentada unos 6 minutos, se colocó la muestra lo más centrado posible cara abajo (sección

transversal a analizar) sobre su vástago, después se llenó de resina fenólica con una precarga de 8.7MPa y una carga de 23.2Mpa en un tiempo establecido (Anexo 5) de 7 minutos para obtener el encapsulado respectivo.

- Para el lijado o desbaste tosco-medio se empleó sobre una *Pulidora Manual* con sus respectivas lijas de número 240, 320, 400 y 600 (número de grano por pulgada cuadrada). Esta técnica de lijado es lenta y continua hacia abajo (un solo sentido) con alta refrigeración por agua (mantiene fría la muestra y no altera la estructura superficial del metal). En un determinado tiempo de lijado es esencial girar a 45° la probeta, así se van eliminando las líneas de pulido anteriores constantemente se va avanzando a las siguientes lijas. Su plenitud y pulido se basó en una óptima destreza de manipulación.

- Luego pasó a una *Pulidora Automática,* donde cada probeta es asentada en una sola posición sobre lijas extremadamente finas de 15 y 9µm que están adheridas a un disco giratorio (desbaste fino). El tiempo de pulido en una probeta sobre cada lija fue alrededor de 3 a 5 minutos con velocidad entre 100 a 300rpm.

- El pulido final se realizó un proceso similar al anterior sobre el mismo equipo, pero en paños de 5, 3 y 1 µm con su respectiva alúmina (Al_2O_3 óxido de aluminio) en un lapso de 2 minutos, hasta obtener un brillo favorable sin líneas (espejo). Fue indispensable tener las manos limpias y no tocar la zona del material a analizar.

- Por último, cada probeta fue limpiada por el método más empleado, manteniéndolas bajo un chorro de agua, después enjuagadas con alcohol y secadas rápidamente en un flujo de aire caliente.

1. Corte a precisión de cada probeta.
2. Encapsulado fenólico de probetas.
3. Lijado manual del material (eliminación de líneas cruzadas).
4. Pulido automático sobre lijas en micras (µm).
5. Pulido automático sobre paños con alúmina.
6. Limpieza automática sobre paños con alúmina.

Figura 20. – Diseño del proceso metalográfico. **Fuente:** Autor.

❖ Equipos

- Cortadora de Precisión "BUEHELER – Isomet 1000 – precision SAW"
- Encapsuladora de Probetas "BUEHELER – Simplimet – mounting press"
- Pulidora Manual "BUEHELER – Handimet 2 Roll Grinder"
- Pulidora Automática "BUEHELER – Metaserv 250 – Grinder Pousher"

❖ Materiales

- Resina fenólica "Powder Black PSI-202-5 / Powder Green PSI-201-5"
- Lijas "BUEHELER – 240, 320, 400 y 600"
- Lijas "BUEHELER – 15 y 9 µm"
- Paños "BUEHELER – 5, 3, 1 y 0.5µm"

- Alúmina "BUEHELER – 5, 3, 1 y 0.5μm"
- Alcohol
- Secador de cabello

6.1.4. Ataque químico - electroquímico e identificación microscópica ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ)

Los atacantes fueron basados bajo la norma *ASTM E407*-07$^{\varepsilon 1}$ para identificar el tipo de solución en función del material estudiado. Existen dos tipos de ataque: *Químico y Electroquímico.*

Para el ataque químico se identificó 5 soluciones y para el electroquímico 3 soluciones; las cuales son compuestas por reactivos controlados de un peso (*Balanza de Exactitud*) y cantidad establecida (tabla 3).

Todo esto se logró sometiendo la probeta a la acción química sobre el reactivo correspondiente bajo condiciones cuidadosamente controladas dentro de un *Fume Hood.*

Tabla 3. – Soluciones de ataque Químico y Electroquímico para un acero AISI 304. **Fuente:** (ASTM E407, 2001).

ALEACIÓN DE ACERO INOXIDABLE *AISI 304*		
Norma: ***ASTM E407***	***Fe + 12-20 Cr + 4-10 Ni + < 7% otros elementos***	
Número de Mezcla	Elementos químicos (ingredientes)	Preparación
80	▪ 5mL Cloruro de hidrógeno (HCl) ▪ 1g ácido pícrico (picric acid) ▪ 100mL de etanol (95%) o metanol (95%)	Sumergir o pasar de pocos segundos a 15 minutos. La reacción puede acelerarse agregando unas gotas de 3% de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Opcional: espécimen de revenido entre 600-900 °F antes de la preparación (para los límites de grano de austenita anteriores)
31c	▪ 10g persulfato de amonio ▪ 100mL de agua	Ataque electroquímico: electrolítico a 6V durante segundos a 1 minuto
89	▪ 10mL ácido nítrico (HNO_3) ▪ 10mL ácido acético ▪ 15mL cloruro de hidrógeno (HCl) ▪ 2-5 gotas de glicerol	Use una campana certificada. Sumerja o frote unos segundos o minutos
99	▪ 25mL Cloruro de hidrógeno (HCl) ▪ 3g bifluoruro de amonio ▪ 125mL de agua ▪ Pocos granos de metabisulfito de potasio	Mezcla fresca: (Para la solución madre, mezcle los tres primeros elementos y después agregue metabisulfito de potasio justo antes de usar). Sumergir entre pocos segundos a minutos.
100	▪ 10g cloruro de hierro ($FeCl_3$) ▪ 90mL de agua	Sumergir pocos segundos.
91	▪ 5mL ácido nítrico (HNO_3) ▪ 5mL cloruro de hidrógeno ▪ 1g ácido pícrico ▪ 200 mL etanol (95%) o metanol (95%)	Sumergir 30 segundos o menos
86	▪ 3g ácido oxálico (oxalic acid) ▪ 4mL peróxido de hidrógeno 30% (H_2O_2) ▪ 100mL de agua	Use una campana certificada y probada. La solución debe estar recién preparada. Sumergir de 15-25 minutos. Cuando a las muestras o partes no se puedan dar pulimento metalográfico habitual, se puede requerir grabado múltiple.
220	▪ 20g hidróxido de sodio (NaOH) 100mL de agua	Grabado electrolítico: colores δ-ferrita en acero inoxidable. Usar de 2-20V cc, 5-20 segundos, cátodo de acero inoxidable. Si δ no está coloreado aumente hidróxido de sodio (NaOH) a 40 gramos.

❖ Proceso

- Para el *ataque químico*, cada muestra fue sumergida en el reactivo preparado con la cara pulida hacia arriba en un tiempo específico (segundos), luego lavada con agua, enjuagada con alcohol y finalmente secada en un flujo de aire caliente.

- En cuanto al ataque electroquímico, se investigó cuáles son los reactivos y parámetros establecidos según el material a considerar, para posteriormente construir una celda electrolítica bajo condiciones del proceso.
  Fue esencial también incluir un reverbero a una determinada temperatura, donde se asienta el recipiente con el reactivo establecido para sumergir los electrodos ánodo y cátodo (mismo material). De esta manera se observó una transferencia de electrones a partir del encendido de la fuente (25V) en un tiempo de 40 segundos. También fue lavada y sumergida en agua destilada, donde el mismo recipiente ingresó sobre un *Limpiador Ultrasónico* por 30 segundos y finalmente tuvo que ser secada por un flujo de aire caliente.

- Después de haber realizado el ataque en cada probeta, se llevó a cabo el mismo proceso de secado metalográfico mencionado anteriormente.

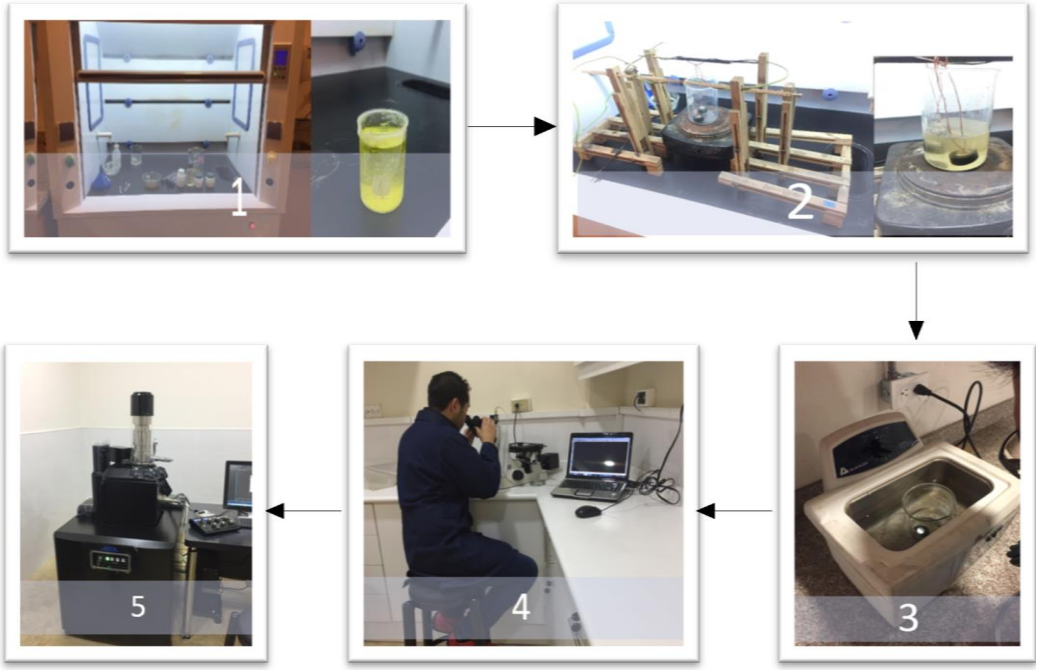
- Posteriormente la muestra mejor atacada se colocó en un *Microscopio Óptico Invertido*, donde pudo observarse con diferentes magnificaciones ciertas estructuras y componentes del material.

  Algunas muestras no fueron bien atacadas por el ácido debido al poco tiempo de sumergido, esto provocó un aspecto invisible de la perlita y de los bordes de grano.
  En caso contrario, también sucedieron ataques excesivos de tiempo que la perlita tomó un aspecto muy negro (quemado); en este caso se pudo hacer un repulido únicamente en paños y después un nuevo ataque.

- Finalmente, una de las probetas metalográficas, fue fijada dentro de la cámara de un *Microscopio Electrónico de Barrido*, siendo uno de los equipos más sofisticados, modernos y delicados de la universidad; con una precisión de 3Nm, una potencia de 30 KW y una magnificación máxima de 300000 x.
  Este equipo se encuentra dividido en ciertos módulos como:

a) El cañón: es donde se generan los electrones por medio de un filamento de tungsteno en tres escalas: secundarios, retrodispersados y de rayos X (dependiendo de la calidad de imagen).
b) La cámara: se coloca la muestra para generar un alto vacío desde 1x10-8 y bajo vacío hasta de 10Pa por medio de bombas. Aquí se recibe las señales de electrones por medio de sensores, que rebotan o penetran sobre la superficie del material convirtiendo en una imagen ya sea su composición química, distribución u otros análisis.
c) Panel de control: es el módulo de mando donde se juega con todos los parámetros de calibración.

Entre las 12 muestras, necesariamente se ejecutaron varias pruebas químicas y electroquímicas, hasta obtener la imagen ideal que identifique el microscopio en base a claridad, estructura general y otros análisis.



1. Preparación del reactivo químico.
2. Preparación del reactivo electroquímico y celda electrolítica.
3. Limpieza ultrasónica de la probeta.
4. Microscopio óptico invertido, observación de muestras químicas atacadas.
5. Microscopio electrónico de barrido, observación de muestras (electroquímicas) atacadas.

Figura 21. – Proceso para ataques y microscopía. **Fuente:** Autor.

❖ **Equipos**

- Fume Hood "BIOBASE FH1200(p)"
- Balanza de Exactitud "METTLER TOLEDO MS"
- Limpiador Ultrasónico "BUEHLER UltraMet 2002"
- Fuente "AGILENT 0-25V, 7A / 0-50V, 4A"
- Microscopio Óptico Invertido "NIKON ECLIPSE MA 100"
- Software "uEye Cockpit"
- Microscopio Electrónico de Barrido "JEOL JSM-IT300LA"
- Software "IT300"

❖ **Materiales**

- Celda electrolítica
- Electrodos ánodo-cátodo (Acero inox. AISI 304)
- Alambre de cobre
- Alcohol
- Agua destilada
- Ácido Nítrico (HNO_3)
- Cloruro de Hidrógeno (HCl)
- Ácido Pícrico
- Etanol (95%)
- Ácido Oxálico ($H_2C_2O_4$)
- Persulfato de amonio $(NH_4)_2S_2O_8$
- Cloruro de Hierro ($FeCl_3$)
- Secador de cabello

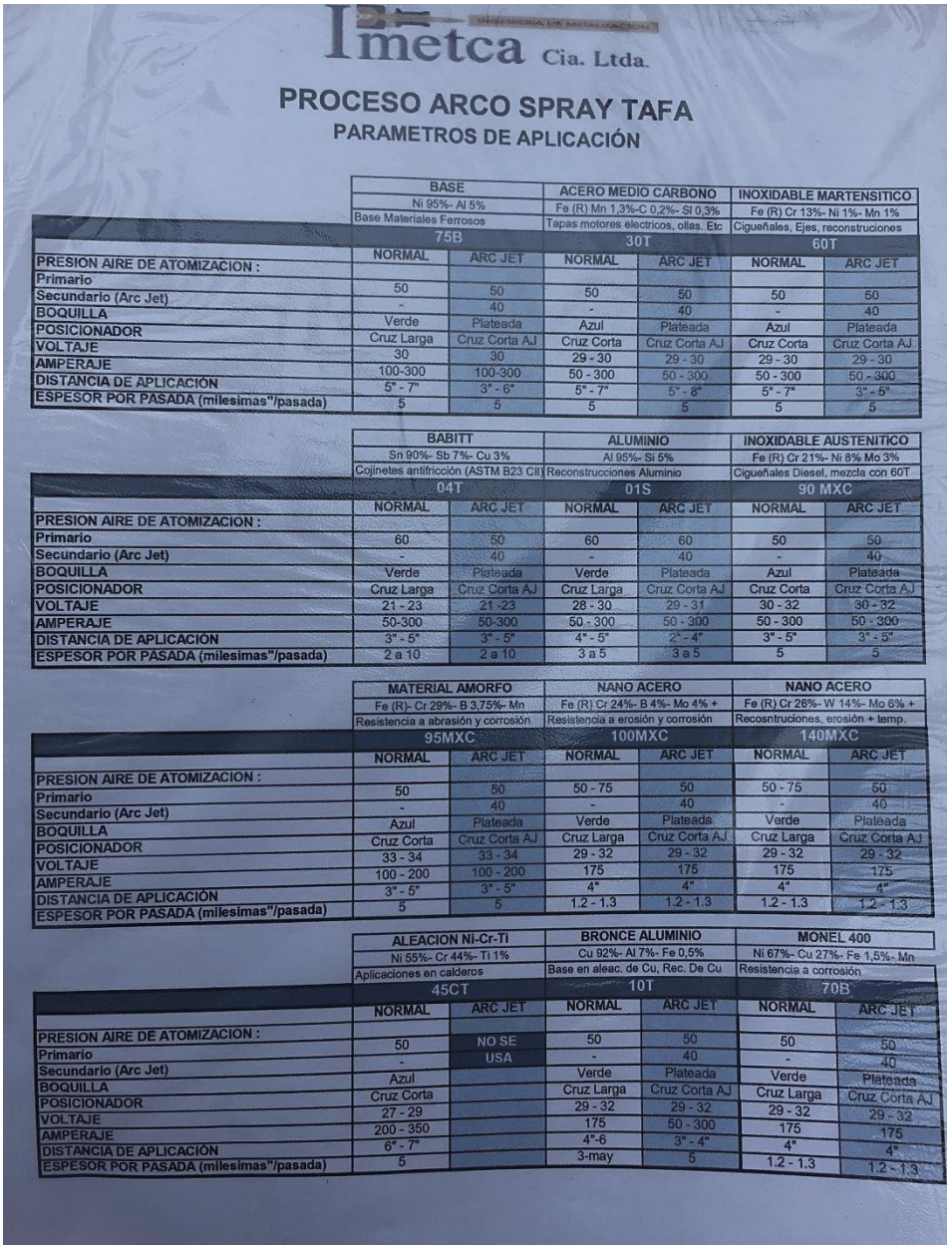
6.1.5. Aplicación por recubrimiento duro

Para completar la metodología de este proyecto, se aplicó el proceso de recubrimiento duro sobre el sustrato y fueron desarrollados en dos instituciones: en la *Universidad Politécnica Salesiana* (Cuenca) y en la

empresa *Imetca Cía. Ltda.* (Quito); bajo parámetros (tabla 4 y figura 22) y técnicas *Arc Spray y Arc JET* respectivamente.

Tabla 4. – Parámetros de la deposición por Arc Spray. **Fuente:** (Morales, Mandujano y Torres, 2013)

Arc Spray	
Presión de aire	50 Psi
Velocidad	10 lb/hr
Amperaje	50-300 A
Voltaje	28-32 V
Distancia de proyección	3-4 in



Imetca Cía. Ltda.

PROCESO ARCO SPRAY TAFA

PARAMETROS DE APLICACIÓN

	BASE		ACERO MEDIO CARBONO		INOXIDABLE MARTENSITICO	
	Ni 95%- Al 5%		Fe (R) Mn 1,3%-C 0,2%- Si 0,3%		Fe (R) Cr 13%- Ni 1%- Mn 1%	
	Base Materiales Ferrosos		Tapas motores electricos, ollas. Etc		Cigueñales, Ejes, reconstruciones	
	75B		30T		60T	
	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET
PRESION AIRE DE ATOMIZACION :						
Primario	50	50	50	50	50	50
Secundario (Arc Jet)	-	40	-	40	-	40
BOQUILLA	Verde	Plateada	Azul	Plateada	Azul	Plateada
POSICIONADOR	Cruz Larga	Cruz Corta AJ	Cruz Corta	Cruz Corta AJ	Cruz Corta	Cruz Corta AJ
VOLTAJE	30	30	29 - 30	29 - 30	29 - 30	29 - 30
AMPERAJE	100-300	100-300	50 - 300	50 - 300	50 - 300	50 - 300
DISTANCIA DE APLICACIÓN	5" - 7"	3" - 6"	5" - 7"	5" - 8"	5" - 7"	3" - 5"
ESPESOR POR PASADA (milesimas"/pasada)	5	5	5	5	5	5

	BABITT		ALUMINIO		INOXIDABLE AUSTENITICO	
	Sn 90%- Sb 7%- Cu 3%		Al 95%- Si 5%		Fe (R) Cr 21%- Ni 8% Mo 3%	
	Cojinetes antifricción (ASTM B23 CII)		Reconstrucciones Aluminio		Cigueñales Diesel, mezcla con 60T	
	04T		01S		90 MXC	
	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET
PRESION AIRE DE ATOMIZACION :						
Primario	60	50	60	60	50	50
Secundario (Arc Jet)	-	40	-	40	-	40
BOQUILLA	Verde	Plateada	Verde	Plateada	Azul	Plateada
POSICIONADOR	Cruz Larga	Cruz Corta AJ	Cruz Larga	Cruz Corta AJ	Cruz Corta	Cruz Corta AJ
VOLTAJE	21 - 23	21 -23	28 - 30	29 - 31	30 - 32	30 - 32
AMPERAJE	50-300	50-300	50 - 300	50 - 300	50 - 300	50 - 300
DISTANCIA DE APLICACIÓN	3" - 5"	3" - 5"	4" - 5"	2" - 4"	3" - 5"	3" - 5"
ESPESOR POR PASADA (milesimas"/pasada)	2 a 10	2 a 10	3 a 5	3 a 5	5	5

	MATERIAL AMORFO		NANO ACERO		NANO ACERO	
	Fe (R)- Cr 29%- B 3,75%- Mn		Fe (R) Cr 24%- B 4%- Mo 4% +		Fe (R) Cr 26%- W 14%- Mo 6% +	
	Resistencia a abrasión y corrosión		Resistencia a erosión y corrosión		Recosntruciones, erosión + temp.	
	95MXC		100MXC		140MXC	
	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET
PRESION AIRE DE ATOMIZACION :						
Primario	50	50	50 - 75	50	50 - 75	50
Secundario (Arc Jet)	-	40	-	40	-	40
BOQUILLA	Azul	Plateada	Verde	Plateada	Verde	Plateada
POSICIONADOR	Cruz Corta	Cruz Corta AJ	Cruz Larga	Cruz Corta AJ	Cruz Larga	Cruz Corta AJ
VOLTAJE	33 - 34	33 - 34	29 - 32	29 - 32	29 - 32	29 - 32
AMPERAJE	100 - 200	100 - 200	175	175	175	175
DISTANCIA DE APLICACIÓN	3" - 5"	3" - 5"	4"	4"	4"	4"
ESPESOR POR PASADA (milesimas"/pasada)	5	5	1.2 - 1.3	1.2 - 1.3	1.2 - 1.3	1.2 - 1.3

	ALEACION Ni-Cr-Ti		BRONCE ALUMINIO		MONEL 400	
	Ni 55%- Cr 44%- Ti 1%		Cu 92%- Al 7%- Fe 0,5%		Ni 67%- Cu 27%- Fe 1,5%- Mn	
	Aplicaciones en calderos		Base en aleac. de Cu, Rec. De Cu		Resistencia a corrosión	
	45CT		10T		70B	
	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET	NORMAL	ARC JET
PRESION AIRE DE ATOMIZACION :						
Primario	50	NO SE	50	50	50	50
Secundario (Arc Jet)	-	USA	-	40	-	40
BOQUILLA	Azul		Verde	Plateada	Verde	Plateada
POSICIONADOR	Cruz Corta		Cruz Larga	Cruz Corta AJ	Cruz Larga	Cruz Corta AJ
VOLTAJE	27 - 29		29 - 32	29 - 32	29 - 32	29 - 32
AMPERAJE	200 - 350		175	50 - 300	175	175
DISTANCIA DE APLICACIÓN	6" - 7"		4"-6	3" - 4"	4"	4"
ESPESOR POR PASADA (milesimas"/pasada)	5		3-may	5	1.2 - 1.3	1.2 - 1.3

Figura 22. – Parámetros de la deposición por Arc Jet. **Fuente: (***Imetca Cía. Ltda., 2017)*

La apropiada selección del alambre está determinada por el metal base, las propiedades deseadas, requerimientos de desempeño, tamaño y forma de la pieza, así como factores económicos.

❖ **Proceso**

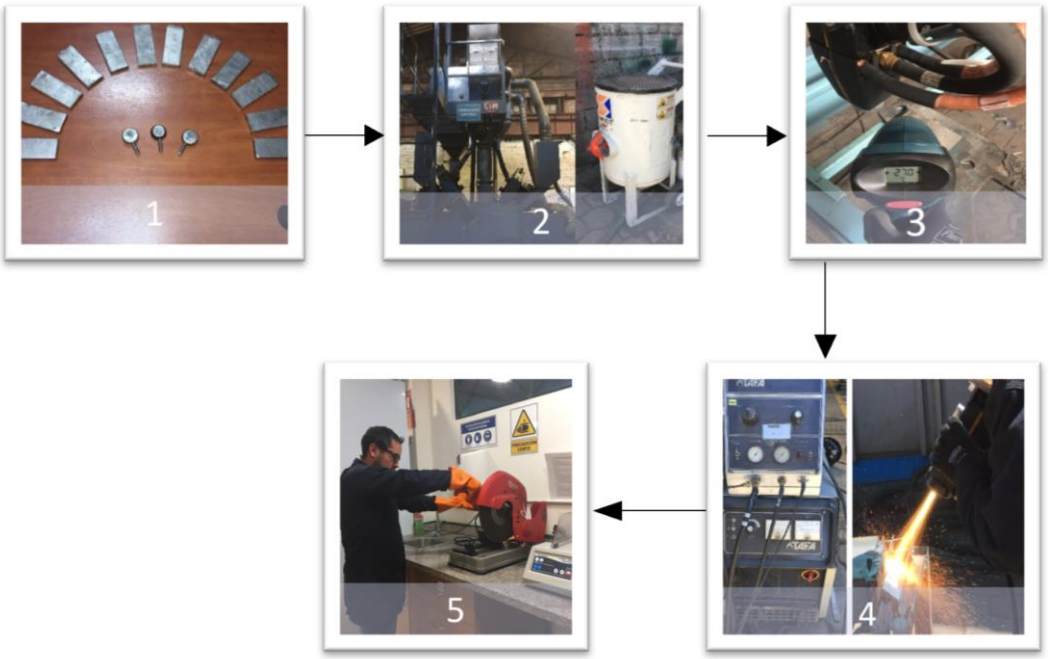
- De la misma colada mencionada anteriormente en el proceso de fundición, también se obtuvo sustrato (iguales dimensiones) para llevar a cabo algunas pruebas de recubrimiento en función a la variación de parámetros.

- La preparación de superficie por rociado con granalla y desengrasante se realizó en la empresa *Vanderbilt* e *Imetca Cía. Ltda.* Con estos procesos se aseguró que el recubrimiento aplicado no se contamine y tenga buena adherencia sobre la base. El tiempo de granallado fue de 10 minutos a una presión de adherencia de 3.000 Psi y de esta manera se obtuvo la rugosidad de 0.63µm.

- Se ajustaron los parámetros de la máquina (U.P.S.-Tabla 4) como *corriente, voltaje, presión de aire tiempo de rociado y distancia de proyección;* para realizar pruebas de rociado antes de iniciar con la deposición final, para comprobar que la velocidad de dosificación del alambre no se vea afectada por atascamiento en las mangueras que conectan con la pistola; y de igual manera su nivel de adherencia.

- De igual manera en la empresa Imetca Cía. Ltda., la máquina thermal spray se parametrizó (figura 22) para realizar tres tipos de recubrimientos: a) Granallado + 60T, b) 75B (NiAl 95/5 %) + 60T y c) 75B + 140/60T. Para un mayor entendimiento revisar los anexos 19, 20 y 21.

- Por último, se obtuvo una probeta de cada tipo de recubrimiento más el sustrato por medio de corte sensitivo, para posteriormente realizar los ensayos correspondientes.



1. Obtención del sustrato para pruebas de recubrimiento.
2. Preparación de la superficie.
3. Ajuste de parámetros U.P.S.
4. Ajuste de parámetros Imetca Cía. Ltda.
5. Corte sensitivo de probetas.

Figura 23. – Proceso de aplicación para recubrimientos duros. **Fuente:** Autor.

❖ Equipos

- Granalladora y limpiadora "Cym GMG-003, Vanderbilt"
- Granalladora "AXXIOM 3.5 CF, Imetca Cía. Ltda."
- Compresor "Fini PLU4, 8 Bar, Imetca Cía. Ltda."
- Thermal Spray "TAFA Model 8830 Arc Spray Gun Operator's Manual, UPS"
- Compresor…
- Thermal Spray "TAFA 8830 Twin Wire Spray System Metco, Imetca Cía. Ltda."
- Sierra sensitiva "Milwaukee 355mm 2300w"

❖ Materiales

- Arena de grano de quarzo redonda (AFS 50/70)
- Medidor de temperatura digital "TROTEC 50 A"

- Alambre "ASMGEUTR720 Alambre Arc Spray EUTRONIC ARC 720 1.6mm"
- Alambre "Praxair and TAFA Arc Spray 13% Chrome Steel Wire - 60T"
- Alambre "Praxair and TAFA Arc Spray BondArc® Wire75B®"
- Alambre "Praxair and TAFA 140 MXC^{TM} Nano Composite Wire"

6.1.6. Ensayo de Desgaste abrasivo ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ)

Este método de prueba cubre los procedimientos de laboratorio para determinar la resistencia de los materiales metálicos a los arañazos por abrasión mediante la prueba de arena seca/rueda de goma. La intención de este método de prueba es producir datos que puedan clasificar los materiales en su resistencia a la abrasión bajo un conjunto específico de condiciones (Norma ASTM G65).

Tabla 5. Parámetros de prueba. **Fuente:** (Norma ASTM G65).

Procedimiento especificado	Fuerza contra espécimen N(lb)	Revoluciones de la rueda	Abrasión lineal		Tiempo de Prueba
			m	(ft)	
A	130 (30)	6000	4.309	14.138	30 min.
B	130 (30)	2000	1.436	4.711	10 min.
C	130 (30)	100	71,8	236	30 seg.
D	45 (10.1)	6000	4.309	14.138	30 min.
E	130 (30)	1000	718	2.360	5 min.

❖ **Proceso**

- En el contexto de la norma se leyó los cinco procedimientos recomendados que son apropiados para grados específicos de resistencia al desgaste o espesores del material a prueba, donde el procedimiento C fue el ideal.
  Procedimiento C: Una variación a corto plazo del procedimiento A para usar en recubrimientos delgados.

- De manera ordenada se puso a punto la máquina de desgaste abrasivo, observando que todos sus componentes se encuentren completos y bajo

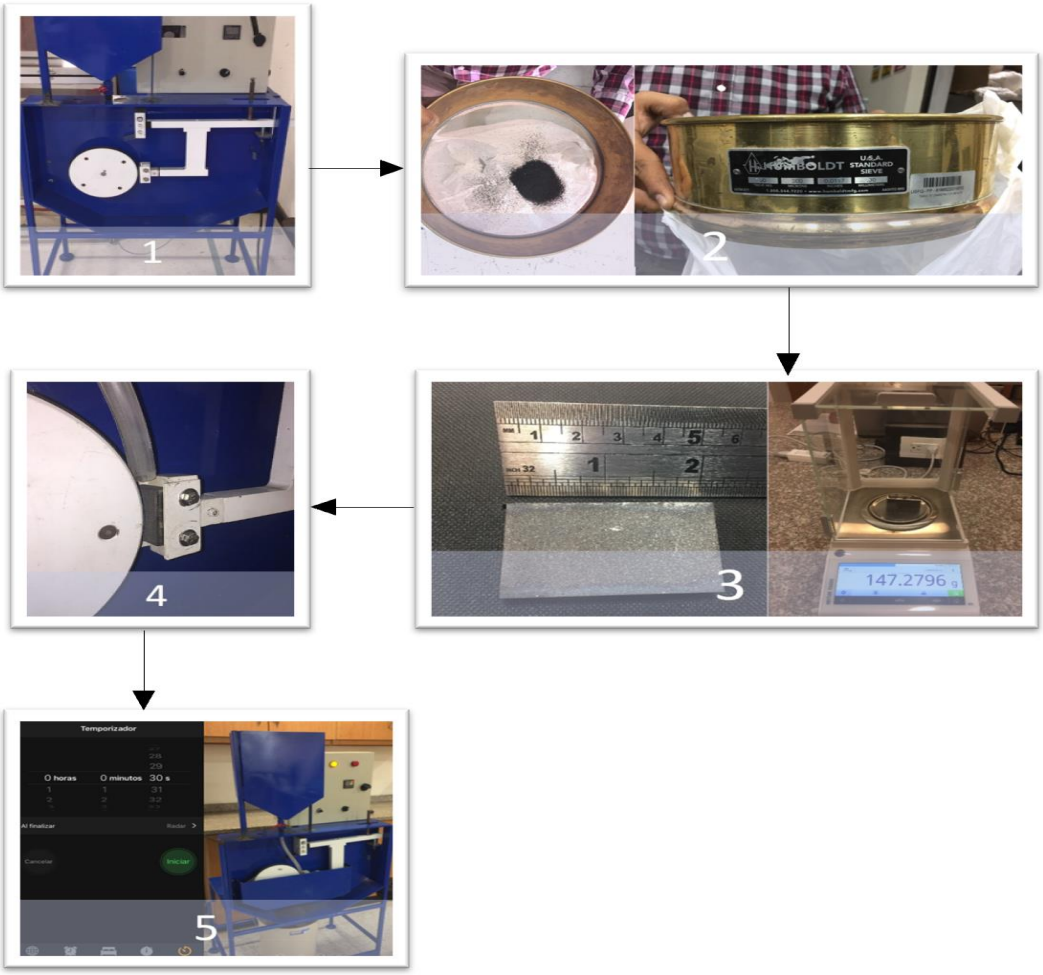
óptimos parámetros establecidos en la tabla 5 (peso, fuerza, flujo de arena, distancia, contador de revoluciones, y tiempo).

- Se consiguió el tamiz (AFS 50/70) bajo una estricta identificación por su correspondiente malla. El tamiz no tiene que cernirse, sino traspasar lentamente por medio de agitación de la malla.

- Las muestras debidamente identificadas se midieron y se pesaron (balanza de precisión de 0.0001 gr para procedimiento C); antes y después de la prueba para registrar su pérdida. Los ensayos de abrasión se informan como pérdida de volumen (m^3) o pérdida de masa (gr) por procedimiento especificado.

- Para sujetar la muestra en la máquina, se realizó de forma segura y centrada sobre su correspondiente mordaza, manteniendo la distancia establecida bajo norma, entre la superficie a desgastarse y la rueda de goma.

- Finalmente se encendió la máquina y bajo maniobras se realizó el ensayo durante 30 segundos a cada una de las muestras o probetas con un flujo de arena constante como indica la norma.



1. Parametrización de la máquina.
2. Comprobación del tamiz.
3. Peso y medición de cada probeta.
4. Sujeción de probeta.
5. Realización de ensayo por 30 segundos.

Figura 24. – Proceso para el ensayo de desgaste abrasivo por procedimiento C. **Fuente:** Autor.

❖ Equipos

- Máquina tesista construida para la USFQ, determina el Desgaste Abrasivo

❖ Materiales

- Tres pesas de gimnasio (14 kg. = 30.8 lb.)
- Una tobera de ½ in. de diámetro por 6 in. de largo
- Tamiz (AFS 50/70) y malla
- Contenedor

6.1.7. Ensayo de Microdureza Vickers y Medición de altura por desgaste ("Laboratorio de Metalografía, Universidad San Francisco de Quito" USFQ)

Hay varios tipos de pruebas para determinar la dureza, todas ellas están basadas en la capacidad del material para resistir la penetración de una punta de diamante con una carga específica y un tiempo predeterminado.

Estas pruebas son a menudo llamadas "pruebas de microdureza", aunque el término más exacto es prueba de dureza de micro indentación, debido a las bajas cargas que los indentadores transportan. La punta de estos patrones produce una depresión cuadrada, cuya extensión se mide en micras (µm) al microscopio y se convierte en unidades de Vickers y el valor resultante es inversamente proporcional a la dureza de la estructura (Eick, 1981) Arenas, Hersktröter y Witjes, 1989).

❖ **Proceso**

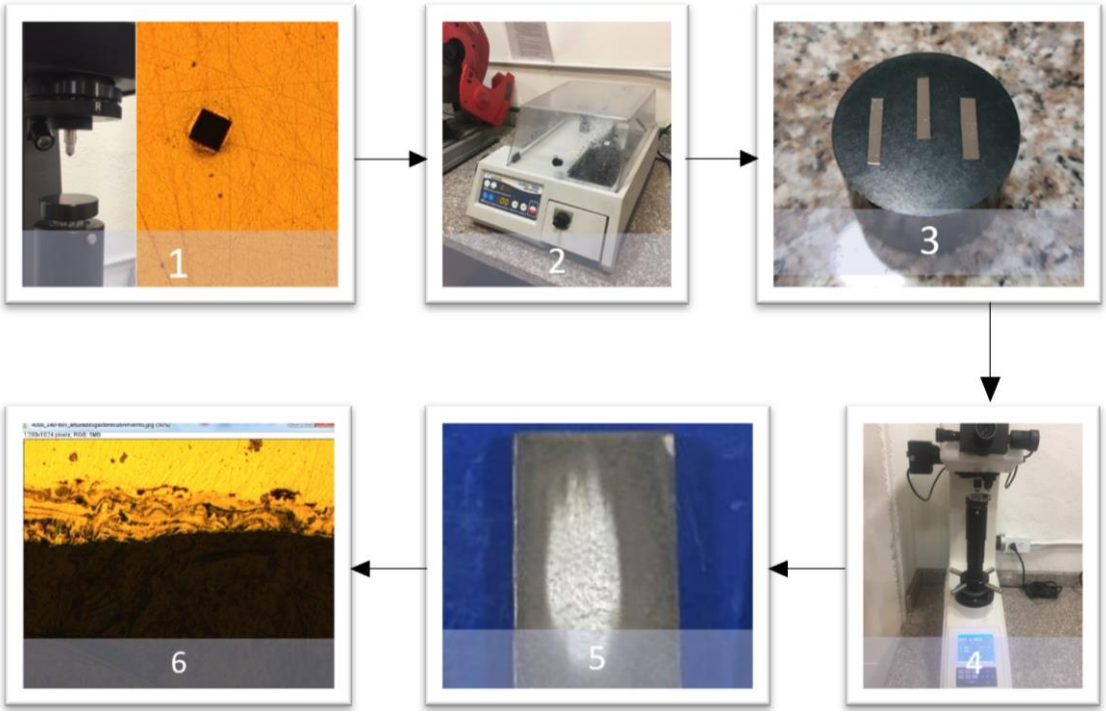
- El proceso comenzó con la calibración y verificación del equipo Vickers por medio del indentador (punta diamante) específico en base al material a analizar. La guía y pautas para el cálculo y calibración se encuentran detalladas en la *hoja Patrón de este indentador, la microdureza establecida por este patrón es* $\mathbf{497.0}\boldsymbol{HV_3}$, ver el anexo 22.
- En cuanto al material a analizar, se realizó un corte refrigerado de cada muestra para obtener probetas más pequeñas de 7 x 7 y por 3mm de espesor, en las que se puedan realizar la técnica de metalografía. El objetivo fue obtener la cara transversal de cada probeta en la que se pueda mirar el sustrato y el recubrimiento adheridos en el equipo Vickers.

- Desarrollo metalográfico de tres superficies transversales en una sola probeta.

- Con un pulido ideal verificado en el microscopio óptico invertido, se tomó 9 datos de microdureza en cada uno de los tres tipos de recubrimientos en el equipo Vickers.

- En cuanto a la medición de altura, se tomó el material restante (la probeta más resistente) para realizar un semicorte transversal justo en el lugar donde sufrió el desgaste.

- En la superficie transversal se realizó de igual manera el proceso metalográfico, de esta manera en el microscopio óptico invertido de pudo apreciar su sección de desgaste.



1. Parametrización de la máquina.
2. Comprobación del tamiz.
3. Peso y medición de cada probeta.
4. Sujeción de probeta.
5. Realización de ensayo por 30 segundos.

Figura 25. – Proceso para el ensayo de microdureza Vickers y medición de altura por desgaste.
Fuente: Autor.

❖ Equipos

- Microdurómetro Vickers "Wilson Hardness 432SVD"
- Sierra sensitiva "Milwaukee 355mm 2300w"
- Microscopio Óptico Invertido "NIKON ECLIPSE MA 100"
- Equipos metalográficos (mencionados en el punto 6.1.3)

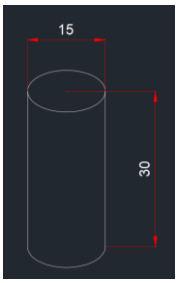
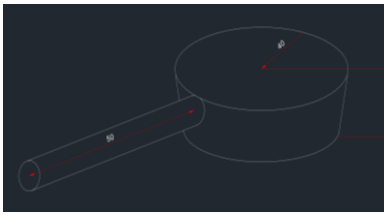
❖ Materiales

- Materiales metalográficos (mencionados en el punto 6.1.3).

7. Resultados

7.1. Obtención del material base

Tabla 6. Resultados de obtención del material base. **Fuente:** Autor.

Proceso	Material	Número de probetas	Dimensión	Imagen
Fundición en Acero	Acero inoxidable AISI 304 (lingote mecanizado y cortado)	3		
	Acero inoxidable AISI 304 (ensayos de dureza)	4		

7.2. Determinación de la composición química del material del material base

Tabla 7. Composición química del material base. **Fuente:** Autor.

Ensayo espectrométrico AISI 304				
Elemento	**Quema 1**	**Quema 2**	**Quema 3**	**Promedio**
Fe %	*70.993*	*71.241*	*70.619*	*70.955*
C %	*0.149*	*0.154*	*0.139*	*0.150*
Si %	*0.407*	*0.391*	*0.398*	*0.401*
Mn %	*1.884*	*1.884*	*1.884*	*1.884*
P %	*0.060*	*0.060*	*0.060*	*0.060*
S %	*0.010*	*0.010*	*0.010*	*0.010*
Cr %	*17.408*	*17.264*	*17.594*	*17.421*
Mo %	*0.132*	*0.129*	*0.130*	*0.131*
Ni %	*7.949*	*0.952*	*7.973*	*7.969*
Al %	*0.021*	*0.019*	*0.017*	*0.018*
Co %	*0.120*	*0.113*	*0.123*	*0.118*

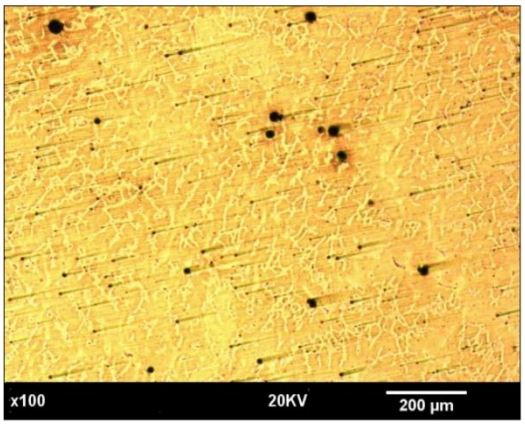
Cu %	*0.102*	*0.097*	*0.109*	*0.102*
Ti %	*0.041*	*0.041*	*0.041*	*0.041*
V %	*0.122*	*0.117*	*0.122*	*0.122*

7.3. Obtención de imágenes por ataque químico, electropulido y electroquímico en muestras metalográficas

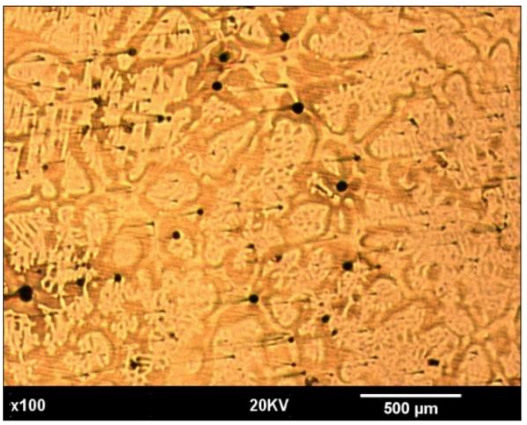
Tabla 8. Determinación de ataque químico 80_91. **Fuente:** Autor.

Ataque Químico **Norma *ASTM E407*-07$^{\varepsilon 1}$**				
Número de ataque	**Composición**		**Tiempo de sumersión**	**Magnificación**
80	- 5 mL Cloruro de hidrógeno (HCl). - 1 g ácido pícrico. - 100 mL de etanol (95%) o metanol (95%).	**Microscopio óptico invertido**	10 minutos	100x
			13 minutos	100x
			15 minutos	100x

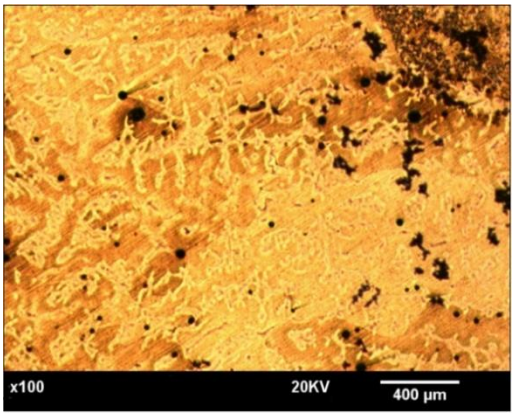
Figura 26. – Captura M.O.I. **Fuente:** Autor.



a) A304_80_10m_100x



b) A304_80_13m_100x



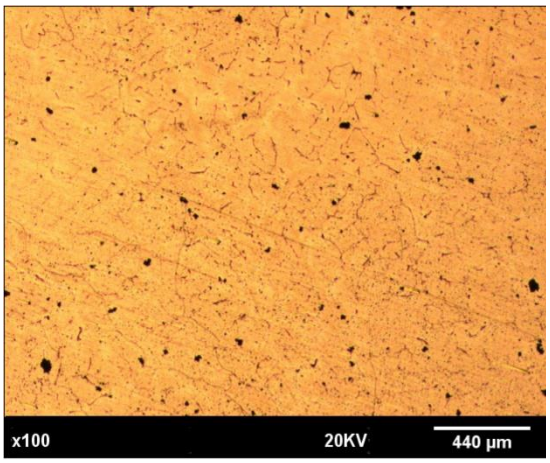
c) A304_80_15m_100x

Interpretación

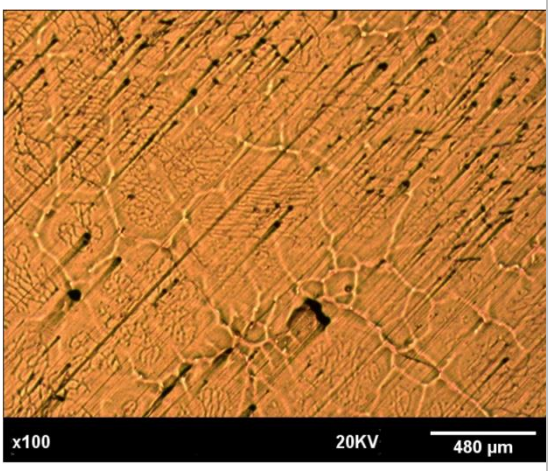
a	*El atacante empleado requiere de un tiempo elevado de 10 minutos siendo el ácido pícrico el más fuerte componente. Como se observa en la imagen, no es suficiente tiempo ya que no interpreta los bordes de grano.*
b	*Con un tiempo de 13 minutos, este atacante comienza a querer señalar los bordes, pero no lo logra.*
c	*Se llegó a los 15 minutos y la muestra con este atacante resultó quemada, como se puede observar en la esquina superior derecha. El atacante no fue ideal.*

Número de ataque	Composición		Tiempo de sumersión	Magnificación
91	- 5 mL ácido nítrico (HNO_3). - 5 mL cloruro de hidrógeno (HCl). - 1 g ácido pícrico. - 200 mL de etanol (95%) o metanol (95%).	**Microscopio óptico invertido**	3 minutos	100x
			5 minutos	100x
			5 minutos	200x
			5 minutos	1000x
			6 minutos	400x
		Microscopio electrónico de barrido	5 minutos	220x
			5 minutos	750x

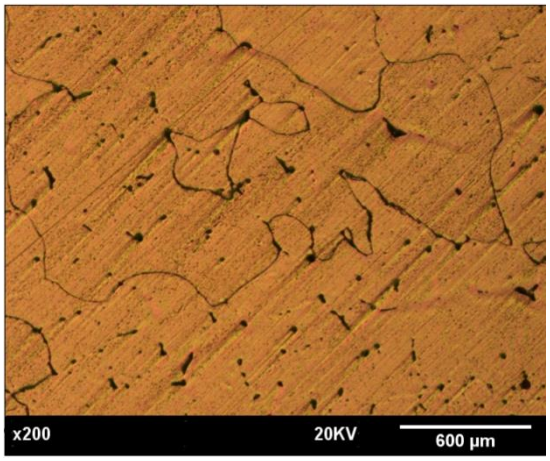
Figura 27. – Captura M.O.I. – M.E.B. **Fuente:** Autor.



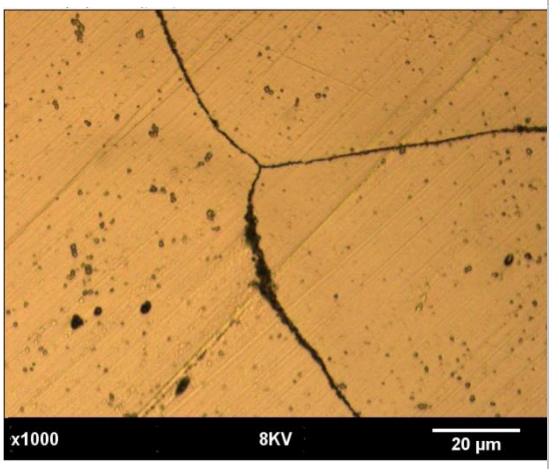
a) A304_91_3m_100x



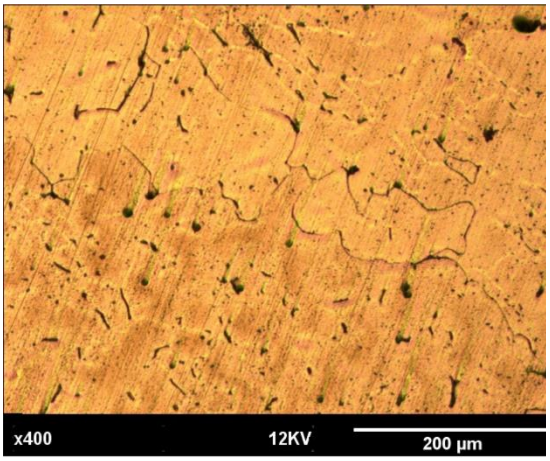
b) A304_91_5m_100x



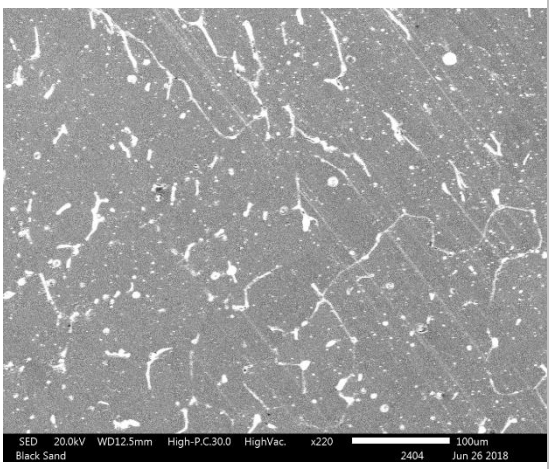
c) A304_91_5m_200x



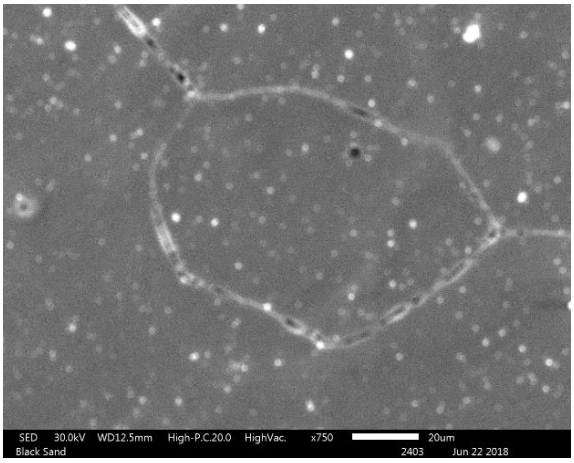
d) A304_91_5m_1000x



e) A304_91_6m_400x



f) A304_91_5M_220x



g) A304_91_5m_750x

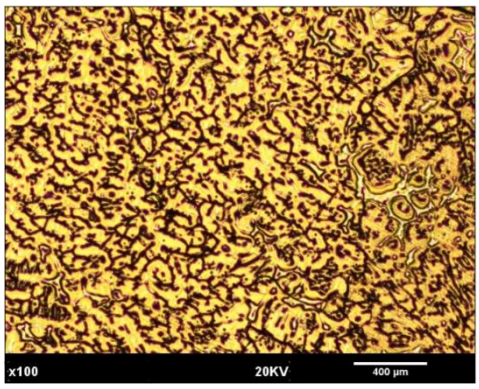
Interpretación	
a	*El ácido nítrico y el picral son los componentes que más actúan dentro de este atacante sumergido por 3 minutos. Con una magnificación de 100x se observan ciertas líneas finas del grano.*
b	*A los 5 minutos con la misma magnificación se aprecia subdivisiones dentro de los bordes de grano.*
c	*Al mismo tiempo, pero a 200x ya se puede apreciar un borde de grano.*
d	*Vértice por la unión de bordes a 1000x.*
e	*Si se alarga el tiempo a 6 minutos, se observa a 400x que la zona inferior de la imagen se ha quemado brevemente.*
f	*La muestra ingresada en el microscopio electrónico de barrido (SEM) no define con claridad los bordes de grano, esto indica que este atacante no es lo suficientemente idóneo para el material tratado.*
g	*Sumergido 5 minutos y magnificado a 750x, el SEM enfoca la forma de un grano; que debería tener mejor apreciación y en conclusión se optó por realizar electropulido en las siguientes muestras para poder definir con mayor claridad su estructura metalográfica.*

Tabla 9. Determinación electropulido ASTM E 1558-93 _ASTM E407-07$^{\varepsilon 1}$. **Fuente:** Autor.

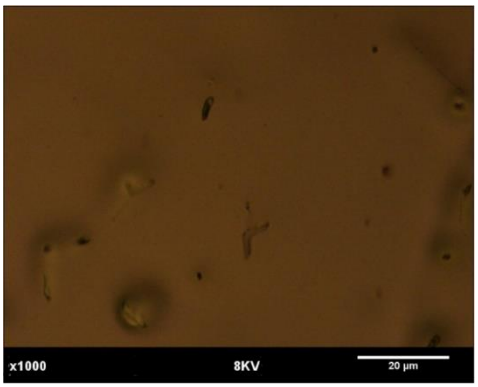
Electropulido **Norma *ASTM E 1558-93***				
Material	Composición		Tiempo de sumersión	Magnificación
	- 140 mL agua destilada.	**Microscopio óptico invertido**	1 minuto	100x
			1,5 minutos	1000x
			1,5 minutos	2000x

Acero inoxidable AISI 304	- 750 mL etanol (95%). - 50 mL ácido perclórico (60 %).	**Microscopio electrónico de barrido**	1 minuto	700x

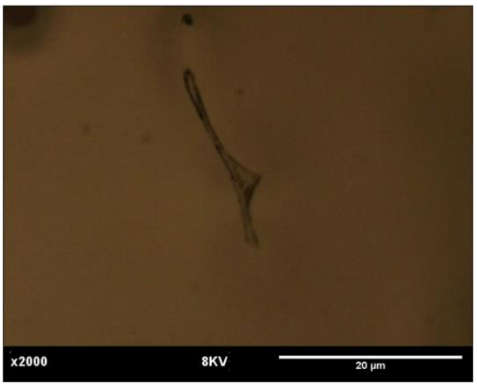
Figura 28. – Captura M.O.I. – M.E.B. **Fuente:** Autor.



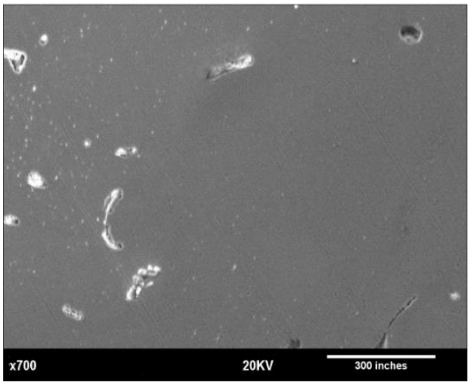
a) A304_Ep_AD_1min_100x



b) A304_Ep_AD_1,5min_1000x



c) A304_Ep_AD_1,5min_2000x



d) A304_Ep_AD_1min_700x

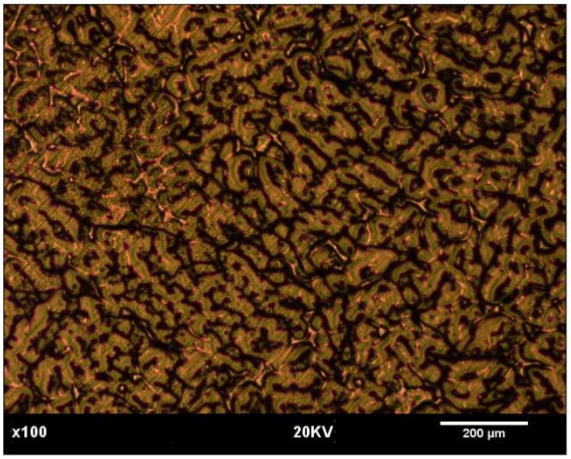
<u>Interpretación</u>

a	*Bajo esta norma ASTM E 1558-93, citan electrolitos ideales en función al material. El ácido perclórico es el que más actúa, ya que sumergido 1 minutos se observa a una magnificación de 100x ya una estructura.*
b	*Hay que considerar también que este material al ser fundición posee varios poros y fisuras en la superficie.*
c	*Poro del material visto a 2000x.*
d	*En el SEM también se observan los poros y más adelante se detalla medidas y profundidades de estos.*

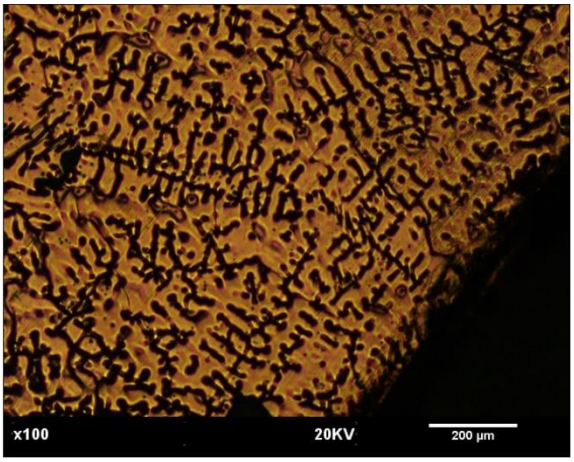
Material	**Composición**		**Tiempo de sumersión**	**Magnificación**
		Microscopio óptico invertido	40 segundos	100x
			20 segundos	100x
			20 segundos	200x

Acero inoxidable AISI 304	- 90 % de agua destilada. - 10 % ácido oxálico.		20 segundos	400x
		Microscopio electrónico de barrido	20 segundos	80x

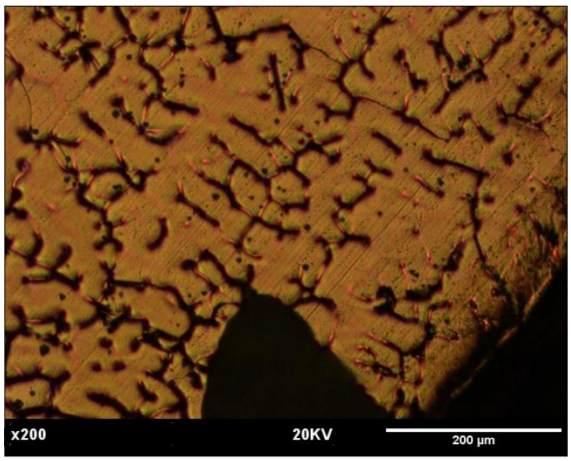
Figura 29. – Captura M.O.I. – M.E.B. **Fuente:** Autor.



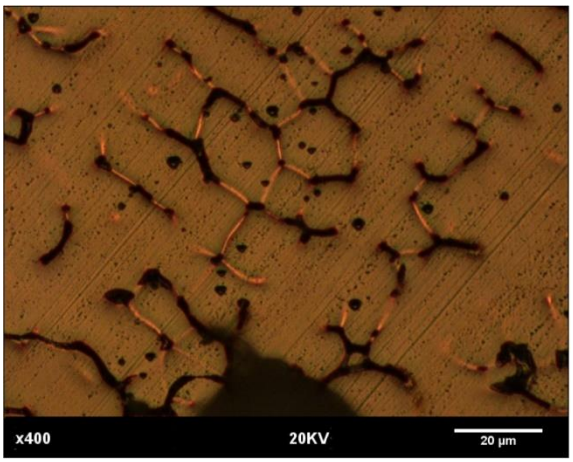
a) A304_Ep_AO_40s_100x



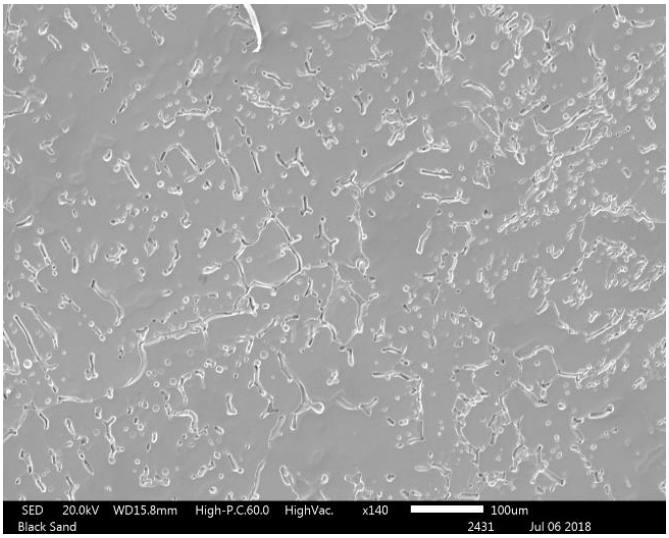
b) A304_Ep_AO_20s_100x



c) A304_Ep_AO_20s_200x



d) A304_Ep_AO_20s_400x



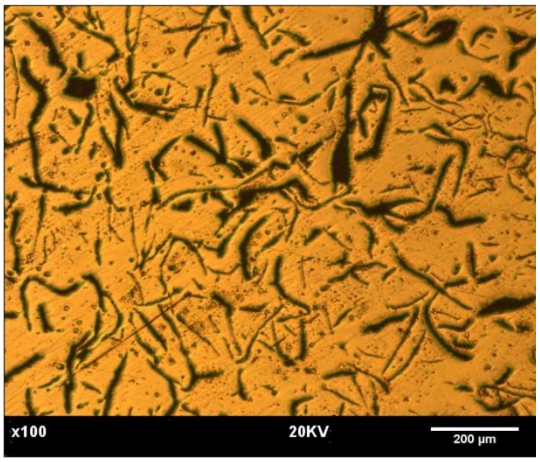
e) A304_Ep_AO_20s_80x

Interpretación	
a	*Bajo la misma norma, el ácido oxálico es el principal componente de ataque. A 40 segundos de haber estado sumergido, genera una imagen más clara de si estructura de granos a 100x.*
b	*Cuando se sumerge a un tiempo de 20 segundos se aprecia un dato curioso, el atacante penetra lo suficiente sobre la superficie, generando dendritas en los límites de área. Esta forma se da cuando el material fundido se sobre enfría por debajo del punto de solidificación del metal.*
c	*En la zona central sumergido al mismo tiempo y magnificado a 200x, se observan ciertas características morfológicas de la ferrita tipo vermicular.*
d	*La misma morfología anterior, pero a 400x.*
e	*Siendo llevado al SEM, se aprecia a 80x que este electrolito no solo enfoca límites de grano, sino también ataca directamente a las fisuras del material.*

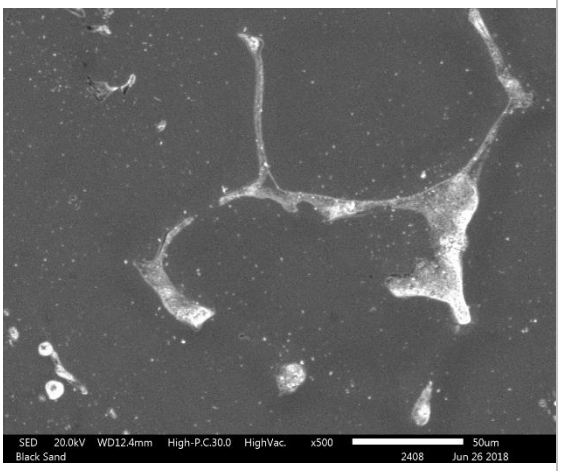
Electropulido
Norma *ASTM E407*-07$^{\varepsilon 1}$

Número de ataque	Composición		Tiempo de sumersión	Magnificación
91	- 5 mL ácido nítrico (HNO3). - 5 mL cloruro de hidrógeno (HCl). - 1 g ácido pícrico. - 200 mL de etanol (95%) o metanol (95%).	Microscopio óptico invertido	5 minutos	100x
		Microscopio electrónico de barrido	5 minutos	500x
			5 minutos	1000x

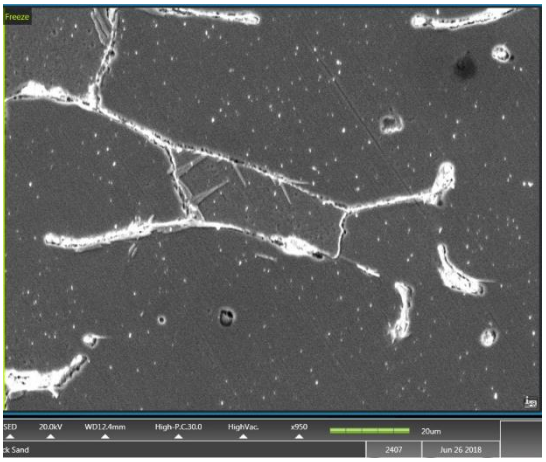
Figura 30. – Captura M.O.I. – M.E.B. **Fuente:** Autor.



a) A304_Ep_91_5min_100X



b) A304_Ep_91_5min_500X



c) A304_Ep_91_5min_950X

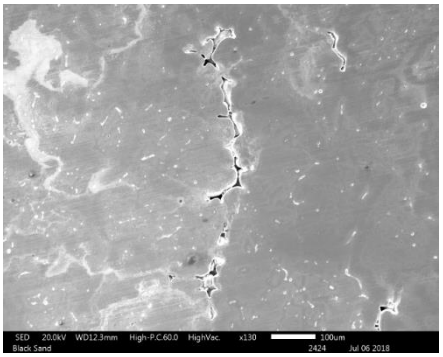
	Interpretación
a	*Realizado bajo esta norma ASTM E407-07$^{\varepsilon 1}$, ambos ácidos de esta composición son los que atacan directamente. Su tiempo ideal de sumersión fue de 5 minutos. Hasta aquí se logró apreciar de mejor manera su estructura general, ya que los aceros inoxidables tienen un alto grado de complejidad en análisis metalográficos.* *Muestra claramente tres zonas el metal base, la zona de fusión y la zona afectada térmicamente. Aumento100x.*
b	*El SEM muestra una gran cantidad de precipitados, presumiblemente de carburos y nitruros de cromo en los límites de este grano. La zona oscura presenta una apariencia bastante irregular.*
c	*Fisura analizada a 100x de magnificación. En los anexos se puede ver con mayor claridad dimensiones y profundidades, tanto de grietas como poros.*

Tabla 10. Determinación de ataque electroquímico 91_AO. **Fuente:** Autor.

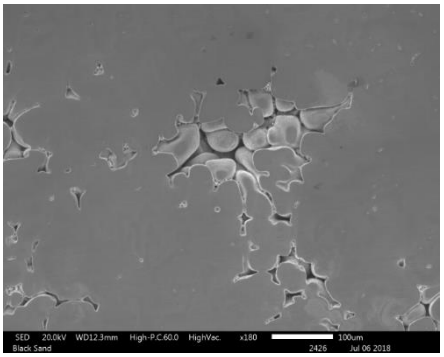
Ataque Electroquímico
Norma *ASTM E407-07*$^{\varepsilon 1}$

Número de ataque	Composición		Tiempo de sumersión	Magnificación
91	- 5 mL ácido nítrico (HNO_3). - 5 mL cloruro de hidrógeno (HCl). - 1 g ácido pícrico. - 200 mL de etanol (95%) o metanol (95%).	**Microscopio electrónico de barrido**	5 minutos	130x
			5 minutos	180x

Figura 31. – M.E.B. **Fuente:** Autor.



a) A304_Et_91_5m_130x



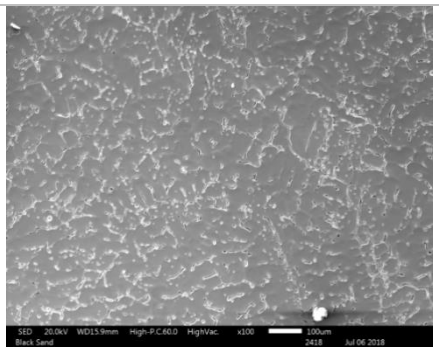
b) A304_Et_91_5m_180x

Interpretación

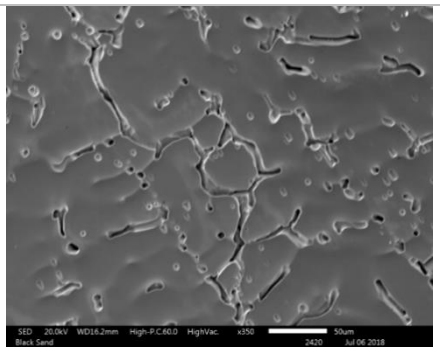
a	*Los ataques electroquímicos vistos por el SEM interpretan una mal formación del material llamadas grietas.*
b	*También se pueden observar el nivel de fundición que está expresado en pequeñas acumulaciones dispersas bajo la superficie del sustrato con un tamaño entre 1-3µm, como se puede observar en la imagen a 180x.*

Material	Composición		Tiempo de sumersión	Magnificación
Acero inoxidable AISI 304	- 90 % de agua destilada. - 10 % ácido oxálico.	**Microscopio electrónico de barrido**	40 segundos	100x
			40 segundos	350x

Figura 32. – M.E.B. **Fuente:** Autor.



a) A304_Et_AO_40s_100x



b) A304_Et_AO_40s_350x

Interpretación	
a	*El ácido oxálico en ataque electroquímico hace visible las gritas del material mas no los límites de grano, la fundición debe ser controlada.*
b	*Estos resultados muestran una importante mejora a realizar en la fundición, al igual que la interacción de las películas pasivas propias del sustrato.*

7.4. Obtención de datos por ensayos de desgaste abrasivo, microdureza Vickers y medición de altura por desgaste.

7.4.1. Ensayo de desgaste abrasivo

Tabla 11. Ensayo: sustrato + 60T. **Fuente:** Autor.

Praxair and TAFA Arc Spray 13% Chrome Steel Wire – 60T			Aplicación **Sust. + 60 T**
Ensayo			
Peso inicial ω_i	147.2796 g	**Registro fotográfico**	
Peso final ω_f	147.2261 g		
Diferencia de masa $\Delta\omega=\omega_i - \omega_f$	0.0535 g		

Tabla 12. Ensayo: sustrato + 75B + 60T. **Fuente:** Autor.

Praxair and TAFA Arc BondArc® Wire75B®		Aplicación **Sust. + 75B + 60 T**
Datos técnicos		
Composición (%)	**Propiedades físicas de recubrimiento**	
▪ *Níquel (Ni):* *95* ▪ *Aluminio (Al):* *5*	*Tamaño del cable:*	*1/16" (1.6mm)*
	Eficiencia del depósito:	*70 %*
	Punto de fusión:	*2642°F (1450°C)*
	Resistencia de unión a la tracción:	*Superficie limpia 9100 psi (62.8 Mpa)* *Superficie chorreada 9750 psi (67.2 Mpa)*
	Revestimiento de textura:	*Depende de la presión del aire 40psi*
	Dureza:	*55 – 80 HRC*
	Densidad de recubrimiento:	*7.8 gm/cc*
	Peso de recubrimiento:	*0.038 lbs/ft^2/mil*
	Propiedades magnéticas:	*Sin magnética, ligera susceptibilidad magnética.*
	Resistencia a la abrasión:	*Buena*
	Impacto y resistencia a la flexión:	*Excelente*
	Coeficiente de expansión térmica:	*7 x 10^{-6} in/in °F (1000°F)*
	Resistividad eléctrica:	*200 μΩcm*
	Resistencia al calor:	*Buena*

Ensayo

Peso inicial ω_i	152.8102 g	**Registro fotográfico**	
Peso final ω_f	152.7805 g		
Diferencia de masa $\Delta\omega = \omega_i - \omega_f$	0.0297 g		

Tabla 13. Ensayo: sustrato + 75B + 140/60T. **Fuente:** Autor.

Praxair and TAFA 140MCX^{TM} Nano Composite Wire			Aplicación **Sust. + 75B + 140/60 T**
Datos técnicos			
Composición (% nominal)		**Propiedades físicas de recubrimiento**	
▪ *Cromo (Cr):*	*<25*	*Tamaño del cable:*	*1/16" (1.6mm)*
▪ *Boro (B):*	*<5*	*Eficiencia del depósito:*	*80 %*
▪ *Molibdeno (Mo):*	*<6*	*Punto de fusión:*	*2200°F (1200°C)*
▪ *Wolframio (W):*	*<15*	*Fuerza de unión::*	*6000 – 8000 psi*
▪ *Manganeso (Mn):*	*<3*	*Revestimiento de textura:*	*Depende de la presión del aire 450 – 650 psi*
▪ *Carbono (C):*	*<4*	*Dureza:*	*67 - 70 HRC*
▪ *Niobio (Nb):*	*<12*	*Densidad de recubrimiento:*	*7.8 gm/cc*
▪ *Silicio (Si):*	*<2*	*Resistencia a la corrosión:*	*Excelente*
▪ *Hierro (Fe):*	*equilibrado*	*Resistencia al calor:*	*Excelente*
Ensayo			
Peso inicial ω_i	142.7173 g	**Registro fotográfico**	
Peso final ω_f	142.7135 g		
Diferencia de masa $\Delta\omega=\omega_i-\omega_f$	0.0038 g		

Tabla 14. Ensayo: sustrato + Arc720. **Fuente:** Autor.

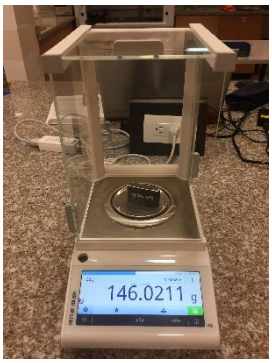
Alambre Arc Spray EUTRONIC ARC720 1.6mm			Aplicación **Sust. + Arc720**
Datos técnicos			
Composición (%)		**Propiedades físicas de recubrimiento**	
▪ *Níquel (Ni):*	*95*	*Dureza:*	*40 – 43 HRC*
▪ *Aluminio (Al):*	*5*	*Recargue duro inoxidable martensítico.*	
Ensayo			
Peso inicial ω_i	146.0211	**Registro fotográfico**	
Peso final ω_f	145.9961		
Diferencia de masa $\Delta\omega=\omega_i - \omega_f$	0.025		

Tabla 15. Ensayo: sustrato S.R. **Fuente:** Autor.

Sustrato – Acero inoxidable AISI 304			Aplicación **Sustrato S.R.**
Datos técnicos			
Composición (%)		**Propiedades físicas de recubrimiento**	
▪ *Níquel (Ni):*	*95*	*Dureza:*	*40 – 43 HRC*
▪ *Aluminio (Al):*	*5*	*Recargue duro inoxidable martensítico.*	
Ensayo			
Peso inicial ω_i	128.0648	**Registro fotográfico**	
Peso final ω_f	127.9126		
Diferencia de masa $\Delta\omega=\omega_i - \omega_f$	0.1522		

7.4.2. Ensayo de microdureza Vickers

Muestra:

Para determinar la muestra ideal, se realizaron ensayos en 10 probetas para cada material de recubrimiento que, posteriormente fueron analizadas en el microscopio óptico invertido para establecer cuales tienen la mejor adherencia del recubrimiento al sustrato.
Posteriormente se realiza el embebido con las mejores muestras de cada recubrimiento.

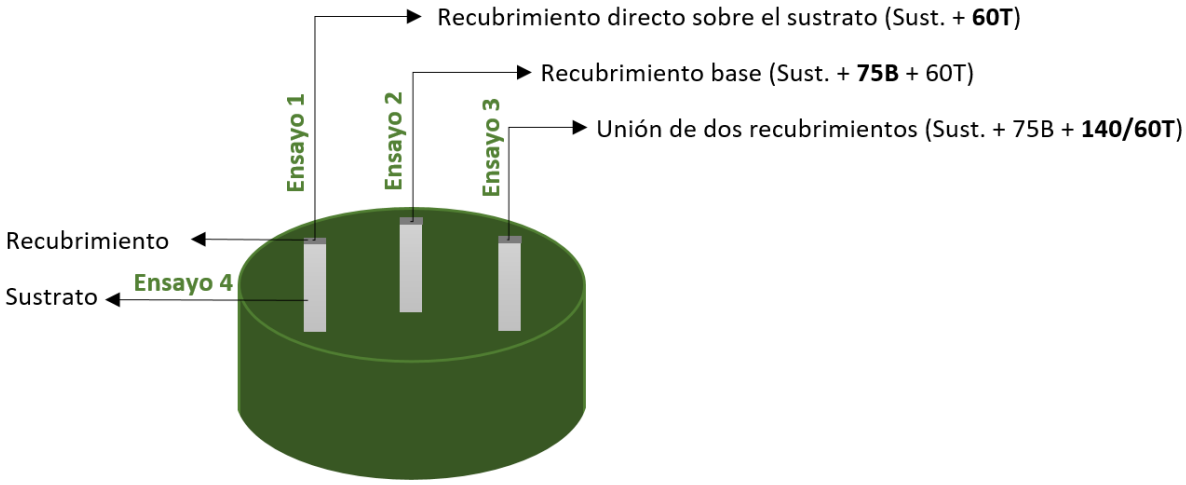


Figura 33. – Muestra para el ensayo de microdureza Vickers de los tres mejores recubrimientos. **Fuente**: Autor.

Para el estudio de los datos de la microdureza de los diferentes recubrimientos, usamos una estadística descriptiva con análisis de tendencia central para establecer la variabilidad de los valores encontrados y la relación de estos con la microdureza del sustrato.

Ensayo 1

Tabla 16. Datos de mediciones 60T. **Fuente:** Autor.

Medición del Recubrimiento 60T			
x (HV_3)	f	F	x*f
299.8	1	1	299.8
291.3	1	2	291.3
289.3	2	4	578.6
284.1	1	5	284.1

269.7	1	6	269.7
254.2	2	8	508.4
244.5	1	9	244.5
		Total:	2476.4

- **Medición 1:**

La mediana se observa en la frecuencia absoluta acumulada (F) del dato obtenido de posición, si no está dentro de la tabla, se considera el siguiente dato y toda esa fila es la mediana ($\boldsymbol{M_e}$), en estos tres casos la del número 5.

La mediana ($\boldsymbol{M_e}$) = 284.1 (HV_3)

La media aritmética es el valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos.

Media o promedio ($\bar{x}$) = *275.15* (HV_3)

Si dos puntuaciones adyacentes tienen la frecuencia máxima, la moda es el promedio de las dos puntuaciones adyacentes.

Moda ($\boldsymbol{M_o}$) = *271.75* (HV_3)

- *Posición*

$$Pos = \frac{n}{2}$$

$$Pos = \frac{9}{2}$$

$$\boldsymbol{Pos = 4.5}$$

- *Promedio*

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{2476.4\ HV_3}{9}$$

$$\boldsymbol{\bar{x} = 275.15\ HV_3}$$

- *Moda*

$$M_o = \frac{(x_1 * 2) + (x_1 * 2) + \cdots (x_n * 2)}{n}$$

$$M_o = \frac{(289.3 * 2) + (254.2 * 2)}{4}$$

$$\boldsymbol{M_o = 271.75\ HV_3}$$

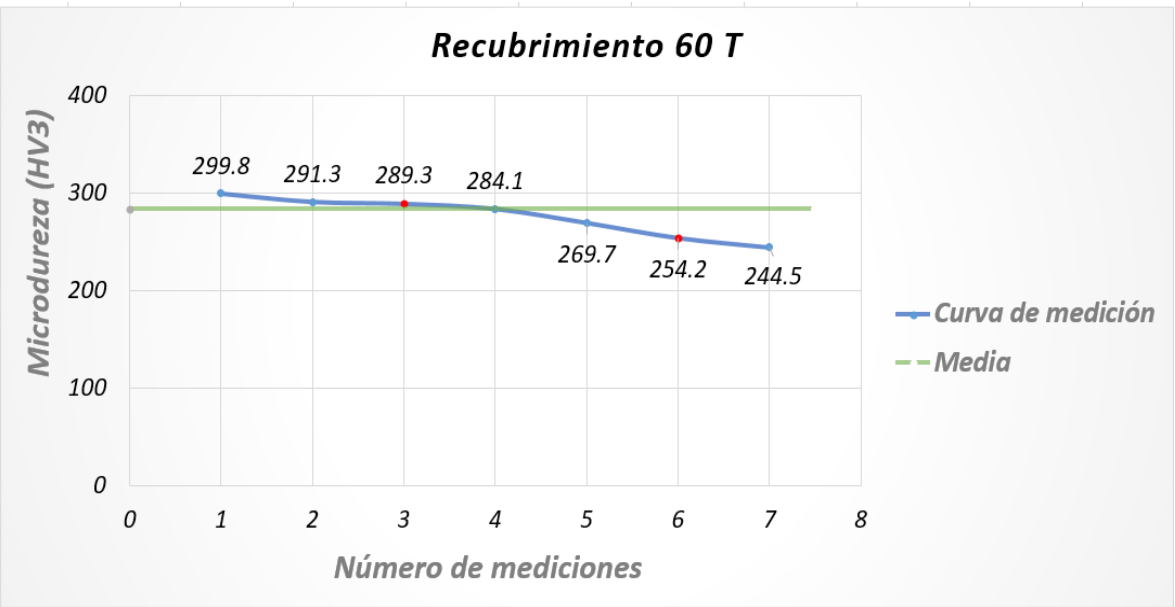


Figura 34. – Gráfica de variabilidad 60T. **Fuente:** Autor.

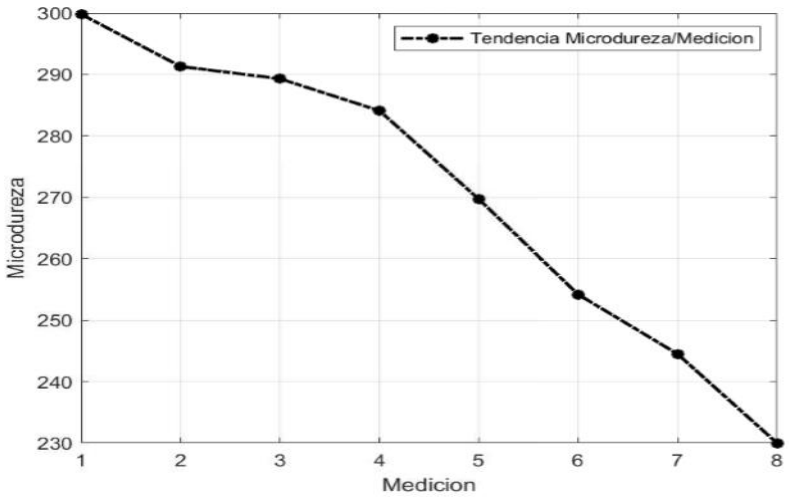


Figura 35. – Escala de variabilidad amplia 60T_Matlab. **Fuente:** Autor.

- **Conclusión del ensayo 1:**

Como se puede observar en las mediciones de microdureza realizadas sobre el recubrimiento duro existe una pequeña variabilidad de los valores obtenidos con respecto a sus medidas de tendencia central (Promedio, mediana y la moda); sin embargo, comparando con las microdurezas del sustrato se puede observar que los valores del recubrimiento son elevados y con respecto a sus promedios aumenta aproximadamente en un 118% mejorando las propiedades superficiales.

Ensayo 2

Tabla 17. Datos de mediciones 75B + 60T. **Fuente:** Autor.

Medición del Recubrimiento 75B + 60T			
x (HV_3)	**f**	**F**	**x*f**
343.4	1	1	343.4
342.5	1	1	342.5
323	2	4	646
321.5	1	5	321.5
319.9	1	6	319.9
303.7	2	8	607.4
300.2	1	9	300.2
		Total:	2880.9

- **Medición 2:**

La mediana ($\boldsymbol{M_e}$) = 321.5 (HV_3)

Media o promedio ($\bar{x}$) = *320.1* (HV_3)

Moda ($\boldsymbol{M_o}$) = *313.35* (HV_3)

- *Posición*

$$Pos = \frac{n}{2}$$

$$Pos = \frac{9}{2}$$

$$\boldsymbol{Pos = 4.5}$$

- *Promedio*

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{2880.9\ HV_3}{9}$$

$$\boldsymbol{\bar{x} = 320.1 HV_3}$$

- *Moda*

$$M_o = \frac{(x_1 * 2) + (x_1 * 2) + \cdots (x_n * 2)}{n}$$

$$M_o = \frac{(323 * 2) + (303.7 * 2)}{4}$$

$$\boldsymbol{M_o = 313.35\ HV_3}$$

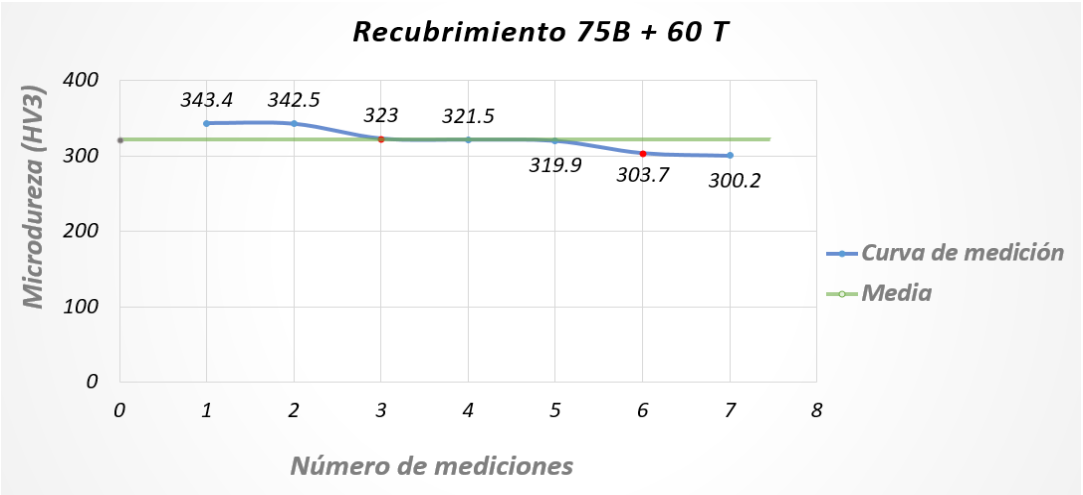


Figura 36. – Gráfica de variabilidad 75B + 60T. **Fuente:** Autor.

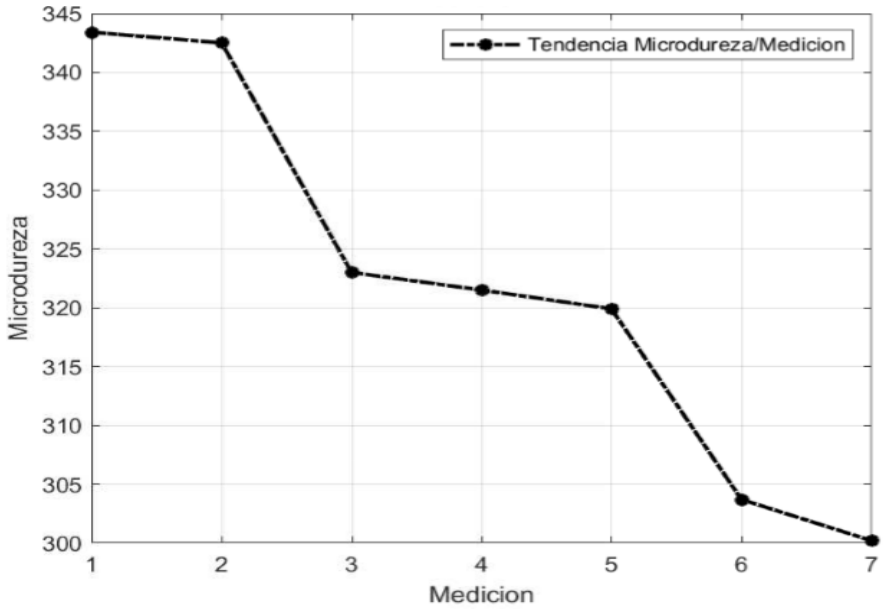


Figura 37. – Escala de variabilidad amplia 75B + 60T_Matlab. **Fuente:** Autor.

Conclusión del ensayo 2:

De igual manera que el ensayo 1, existe una pequeña variabilidad de los valores obtenidos con respecto a sus medidas de tendencia central y comparando con la media de la microdureza del sustrato, se puede observar que los valores del recubrimiento son elevados y con respecto a sus promedios, este aumenta aproximadamente en un 147% mejorando más aún sus propiedades superficiales.

Ensayo 3

Tabla 18. Datos de mediciones 75B + 140/60T. **Fuente:** Autor.

Medición del Recubrimiento 75B +140/60T			
x (HV_3)	**f**	**F**	**x*f**
445.1	2	2	890.2
442.7	1	3	442.7
441.4	1	4	441.4
418.2	1	5	418.2
413	1	6	413
403.1	2	8	806.2
400.9	1	9	400.9
		Total:	3812.6

- **Medición 3:**

La mediana ($\boldsymbol{M_e}$) = 418.2 (HV_3)

Media o promedio ($\bar{x}$) = *423.62* (HV_3)

Moda ($\boldsymbol{M_o}$) = *424.1* (HV_3)

- *Posición*

$$Pos = \frac{n}{2}$$

$$Pos = \frac{9}{2}$$

$$\boldsymbol{Pos = 4.5}$$

- *Promedio*

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{3812.6\ HV_3}{9}$$

$$\boldsymbol{\bar{x} = 423.62\ HV_3}$$

- *Moda*

$$M_o = \frac{(x_1 * 2) + (x_1 * 2) + \cdots (x_n * 2)}{n}$$

$$M_o = \frac{(445.1 * 2) + (403.1 * 2)}{4}$$

$$\boldsymbol{M_o = 424.1\ HV_3}$$

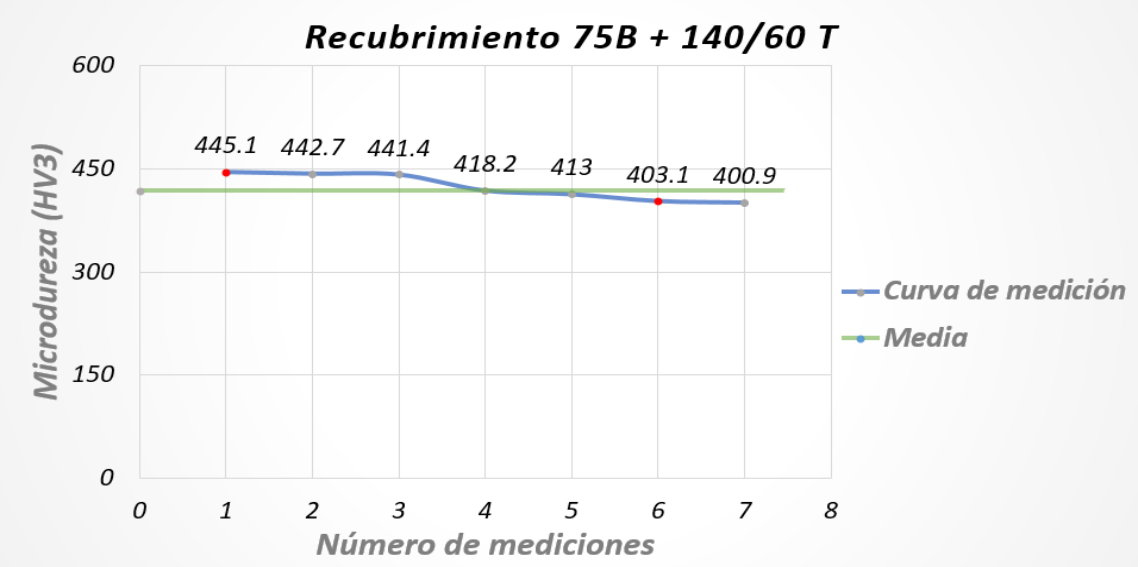


Figura 38. – Gráfica de variabilidad 75B + 140/60T. **Fuente:** Autor.

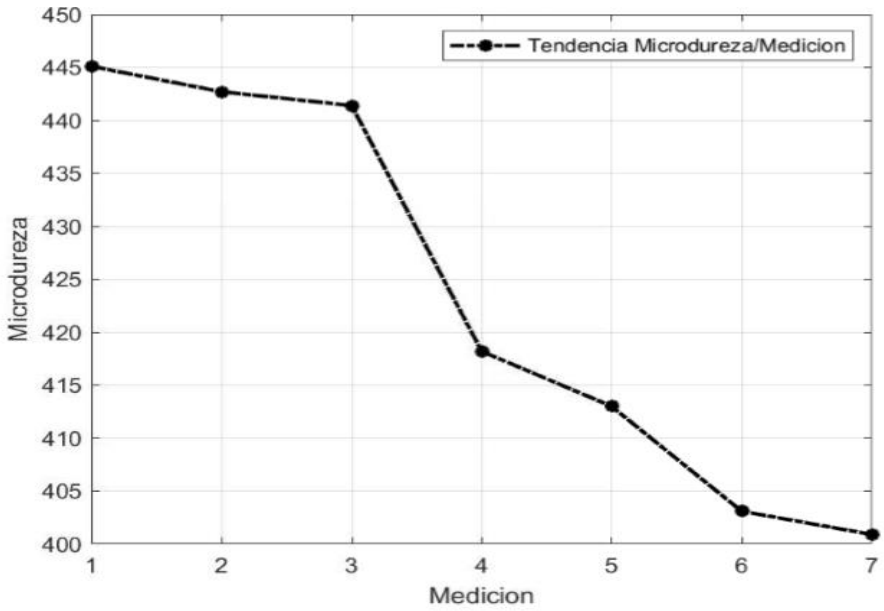


Figura 39. – Escala de variabilidad amplia 75B + 140/60T_Matlab. **Fuente:** Autor.

- **Conclusión del ensayo 3:**

En este último recubrimiento los valores de promedio y moda son muy cercanos a la mediana, no obstante, existe una gran diferencia con la mediana de la microdureza del sustrato. Las durezas medidas en este recubrimiento (75B + 140/60T) son más elevadas que las dos anteriores, ya que su promedio aumenta aproximadamente en un 221.5% mejorando considerablemente las propiedades superficiales.

Ensayo 4

Tabla 19. Datos de mediciones sustrato. **Fuente:** Autor.

Medición del Sustrato			
x (HV_3)	**f**	**F**	**x*f**
162.6	1	1	162.6
130.1	1	2	130.1
123.6	1	3	123.6
		Total:	416.3

- **Medición 4:**

La mediana (M_e) = 130.1 (HV_3)

Media o promedio ($\bar{x}$) = *138.76* (HV_3)

Moda ($\boldsymbol{M_o}$) = En este caso todas las mediciones tienen la misma frecuencia, por lo tanto no hay moda.

- *Promedio*

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{416.3\ HV_3}{3}$$

$$\bar{x} = \mathbf{138.76\ HV_3}$$

- *Posición*

$$Pos = \frac{n}{2}$$

$$Pos = \frac{3}{2}$$

$$\boldsymbol{Pos = 1.5}$$

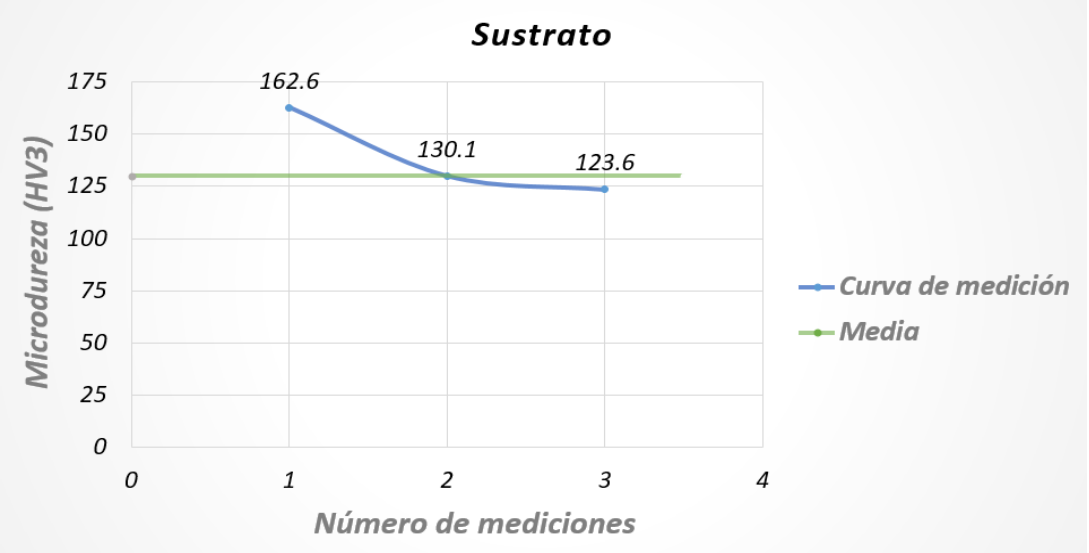


Figura 40. – Gráfica de variabilidad sustrato. Fuente: Autor.

- **Conclusión del ensayo 4:**

Existe variabilidad en el sustrato por ser obtenido por fundición, y al ser analizado en diferentes fases o puntos presenta una microestructura diferente, también por la presencia de poros y grietas.

7.4.3. Medición de altura por desgaste

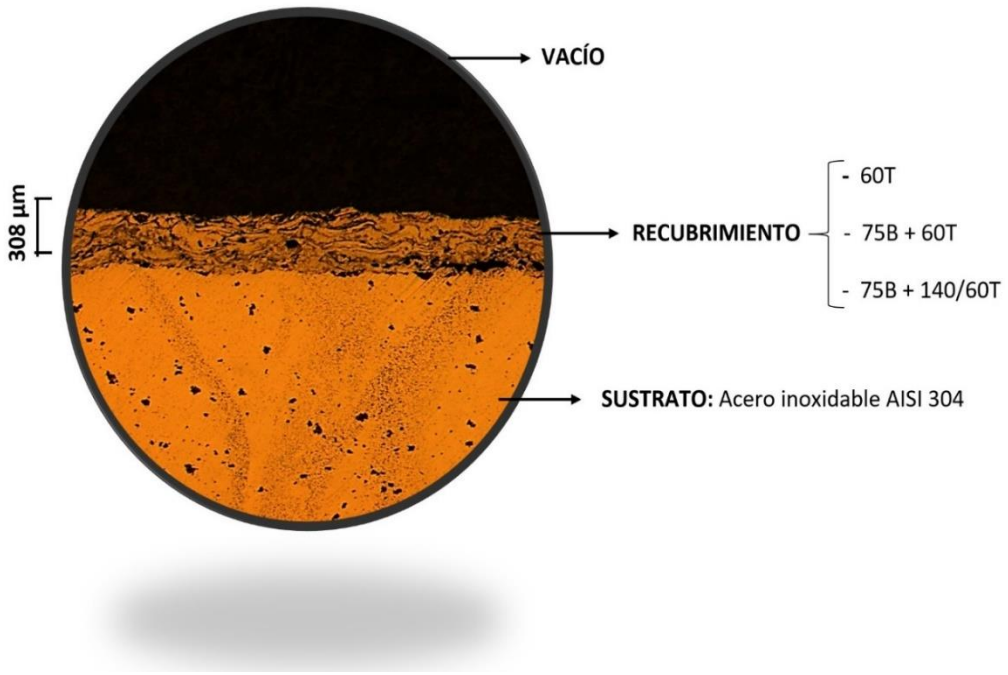


Figura 41. – Recubrimiento duro - M.O.I. **Fuente:** Autor

	Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	200x_140-60T_alturarecubrimiento.jpg	3080	129.315	26	175	-90	308

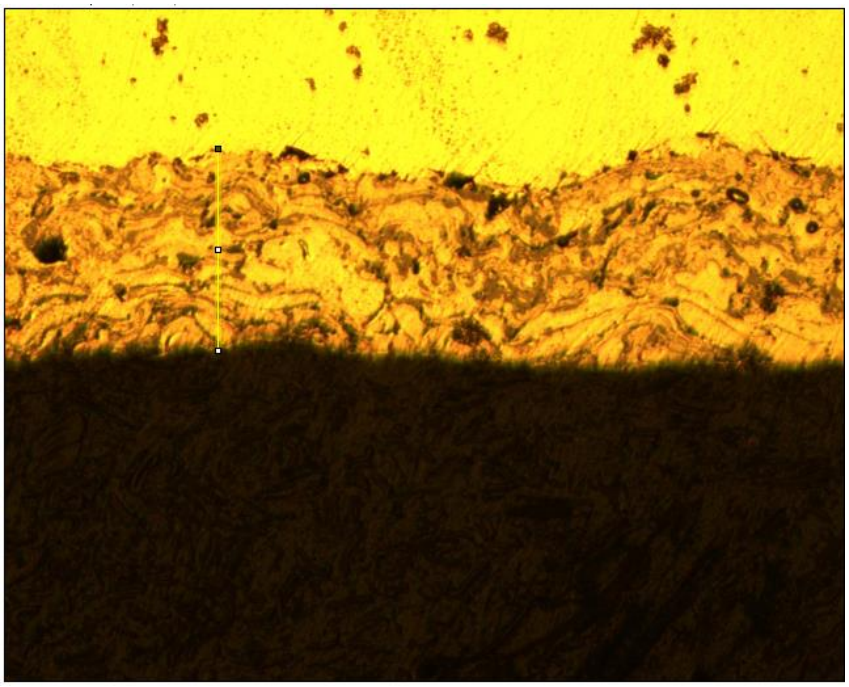


Figura 42. – Alto de recubrimiento 200x_308um. **Fuente:** Autor

	Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	400x_140-60T_alturadesgasterecubrimiento.jpg	740	79.028	10	175	90	74

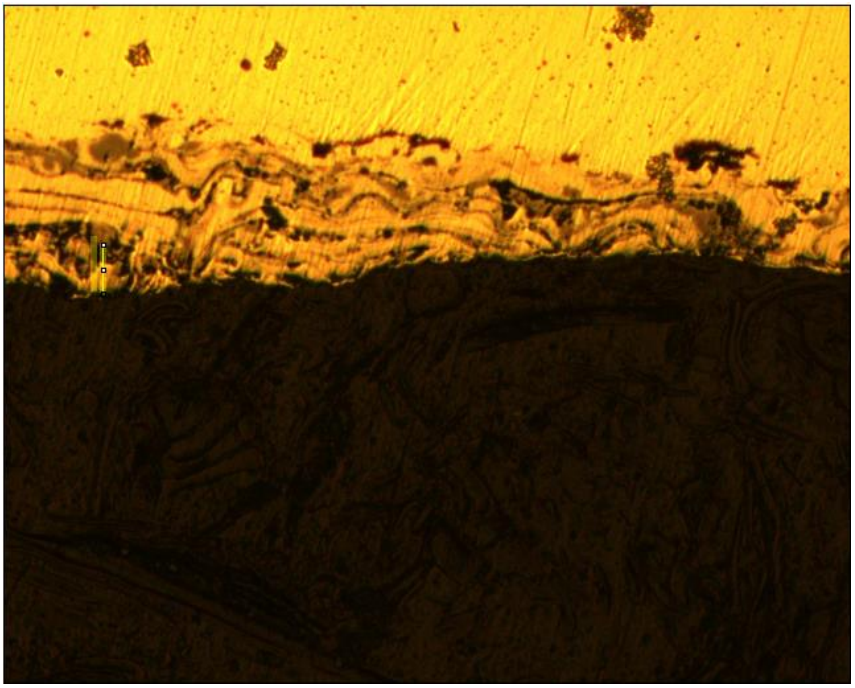


Figura 43. – Alto de recubrimiento 400x_74um. **Fuente:** Autor

8. Conclusiones

La composición química establecida en el material base es: 0.15% C, 70.95% Fe, 0.40% Si, 1.88% Mn, 0.06% P, 0.01% S, 17.42% Cr, 0.13% Mo, 7.96% Ni, 0.018% Al, 0.11% Co, 0.10% Cu, 0.04% Ti y 0.122% V; obtenida en el espectrómetro "BAIRD Spectrovac 1000" de la Constructora Mejía.

Los parámetros óptimos para un recubrimiento duro por Thermal-Spray fueron: -Presión del aire de 50 Psi, -velocidad de 10 lb/hr, amperaje de 50 a 300 A, voltaje de 28 a 32 V y una distancia de proyección de 3 a 4 in.
Estos parámetros exigen un alto nivel de información y control por su adherencia, su apariencia estética y calidad en base a la preparación de superficie.

El desgaste abrasivo del recubrimiento duro corresponde a la norma ASTM G65 que determina por tipos de procedimientos la resistencia del material mediante la prueba de arena seca/rueda de goma.
En el ensayo por procedimiento C, se determinó que el acero AISI 304 presenta una menor resistencia al desgaste abrasivo que el recubrimiento duro, este comportamiento está influenciado por la porosidad del sustrato, puesto que al ser fundición contribuye negativamente a este fenómeno. Por el contrario, los tres tipos de recubrimientos aplicados 60 T, 75B + 60 T y 75B + 140/60 T, poseen una porosidad relativamente baja comparado con otros, esto se presenta debido a que estos recubrimientos tienen una distribución más laminar que deja menor posibilidad de formación de poros con un bajo porcentaje del 0.0026% de desgaste superficial.

9. Recomendaciones

- Para desarrollar un proyecto técnico dirigido hacia el análisis de materiales, es necesario tener los conceptos claros sobre “Metalografía”; a consecuencia de que es una técnica importante para este tipo de investigaciones.

- Para la reducción de procedimientos metalográficos manuales y pulido de probetas especialmente cuando se trata de aceros inoxidables, se recomienda realizar ataques electroquímicos. Es un método de estudio que facilita la visibilidad de su estructura y límites de grano sobre un microscopio. El tamaño de este sistema depende del área total y de la capacidad de la fuente con la cual se cuente.

- Se recomienda que, en el análisis metalográfico mediante microscopía electrónica de barrido de los aceros inoxidables, se aplique la técnica de ataque coloreado (anexo 23). Esta técnica es la más sencilla de todos los procedimientos empleados en la actualidad para "colorear" la microestructura de estas aleaciones y facilitar la identificación y/o cuantificación de fases secundarias como la ferrita en los aceros inoxidables austeníticos o la austenita.

- Se recomienda realizar futuras investigaciones sobre recubrimientos duros con tratamientos térmicos posteriores para determinar el comportamiento microestructural y sus propiedades.

- Finalmente se recomienda la construcción o adquisición de una celda electrolítica para realizar el ataque electroquímico del material.

10. Referencias bibliográficas

AAAHC. (2013). *Accreditation Association for Ambulatory Health Care. Available: http://www.aaahc.org/what-is-accreditation/*

Armada, S., Climent, F. y Guilemany J. (2001). *Evaluación de la resistencia al choque térmico de recubrimientos de estructura gradual obtenidos mediante proyección plasma. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 40.*

Arenas, J., Hersktröter, F., y Witjes M. (1989). *Time dependency of microhardness indentations in human and bovine dentine compared with human enamel. Gelderland, Holanda.*

ASTM E3-01. (2001). *Standard Practice for Preparation of Metallographics Specimens. Available:* http://www.astm.org

ASTM E407. (2001). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. Available:* http://www.astm.org

ASTM G65-00a. (2016). *Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.*

ASTM Vol. 03.02. (1987). *Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. Annual book of Standards.*

Baptista, P., Fernández, C. y Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación. Hill Interamericana de México, S.A. México D.F.*

Cañas, A., Marulanda, J. y Tristancho, J. (2009). *Protección contra la corrosión en sales fundidas de un acero hot rolled, en el rango de temperaturas de 400ºc y 600ºc, recubierto por rociado térmico con acero inoxidable 312. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.*

Colombier, R. y Hochmann, J. (1965). *Aceros inoxidables y aceros refractarios. Francia.*

Coronado, J. y Muñoz, J. (2007). *Análisis mecánico y tribológico de los recubrimientos Fe-Cr-Ni-C y Ni-Al-Mo. DYNA.*

Cuji, A. y Álvarez, J. (2017). *Determinación de los parámetros óptimos de control para el proceso de metalizado sobre la soldadura de tubos pre galvanizados de una pulgada de diámetro. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.*

De la Torre, V., González, M. y Saavedra, N. (2009). *La revolución industrial y el pensamiento político y social en el capitalismo contemporáneo (Siglo XIX). México D.F.*

Eick, D., (1981). *Propiedades físicas y mecánicas. Materiales dentarios. México, D.F.*

Fenn, J., Tanaka, K. y Wüthrich, K. (2002). *The Royal Swedish Academy of Sciences. The Nobel Prize in Chemistry.*

Fincke, J., Swan, W., Bewley, R., Haggard, D., Gevelber, M. y Wroblewski, D. (2001). *Diagnostics and control in the thermal spray process. Surface and Coatings Technology.*

Gamboa, D., Marulanda, J. y Posada, B. (2007). *Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado térmico. Scientia et Technica.*

Gedzevicius, I. y Valiulis, A. (2009). *Analysis of Wire Arc Spraying Process variables on coatings properties. ELSEVIER. Journal of Materials Processing Technology. Lithuania.*

Gómez, R. (2009). *Estudio del comportamiento a desgaste erosivo de recubrimientos WC-Co micro y nano estructurados. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.*

Gutiérrez, M. y Droguet, M. (2002). *La cromatografía de gases y la espectrometría de masas: identificación de compuestos causantes de mal olor. Boletín INTEXTER.*

Herrera, J. (2015). *Estudio comparativo de la resistencia al desgaste adhesivo en un acero aisi/sae 1040 con temple y revenido.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá.

Herrera, M. (2015). *Desarrollo de un prototipo tribológico funcional para evaluar el desgaste por fatiga por contacto de rodadura. Instituto Politécnico Nacional. México D.F.*

Hultman, L. y Sundgren, J. (2001). *Structure/Property Relationships for Hard Coatings. Deposition Technologies, Properties and Applications. Bunshah RF. New York.*

Hunt, K. (1978). *Kinematic Geometry of Mechanisms. Oxford University. Oxford.*

Imetca Cía. Ltda., (2017). *Parámetros de la deposición por Arc Jet.* Quito, Ecuador.

IMO Industries. (1990). *Baird Spectrovac 1000. IBM and PS/2 are registered trademarks of International Business Machines Corporation.*

Isaza, E. Marulanda, J. y Zapata, A., (2007). *Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico. Scientia et Technica.*

Jiménez, L. (2013). *Estudio de la adhesión del sistema capa/substrato de recubrimientos duros formados por difusión de boro en un acero inoxidable AISI 304. Instituto Politécnico Nacional. México D.F.*

Jones, R. (1996). *Thermal barrier coatings in metallurgical and ceramic protective coatings. Londres.*

Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología. México D.F.*

León, M. (2003). *Comportamiento ante el desgaste abrasivo de la aleación de aluminio 7075-T6 con y sin recubrimiento autocatalítico de electroless Ni-P. Universidad Central de Venezuela. Caracas.*

Marulanda, J. (2007). *Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico. Scientia et Technica.*

Morales, J. Mandujano, A. y Torres, J. (2013). Velocidad de corrosión de recubrimientos obtenidos por rociado térmico para su aplicación en turbinas de vapor geotérmico. OmniaScience. Barcelona, España.

Norton, R. (2009). *Diseño de maquinaria. México D.F.*

Pagnola, M. (2009). *Recubrimientos por Thermal Spray. Universidad de Buenos Aires. Argentina.*

Rodríguez, J. (2001). *Propagación de grietas en un acero inoxidable del tipo AISI 304 recubierto con una aleación resistente al desgaste.*

Rojas, A. (2012). *Revisión al estado del arte del proceso de proyección térmica por arco eléctrico. Universidad Libre. Bogotá D.C.*

Romero, C. (2017). *Comportamiento tribológico de un acero inoxidable austenítico en tribómetro bola sobre anillo. INGENIUS.*

Santander, C. (2009). *Estudio experimental de corrosión en metales de uso industrial por desulfovibrio desulfuricans. Universidad de Chile. Santiago de Chile.*

Schmidt, H., y Matthäus, D. (1980). *Stage of development of the arc metal spraying systems new experiences and data. In Proceedings of the 9th International Thermal Spray Conference pp. 225–231. Netherlands.*

Straffelini, G., Molinari, A., y Trabucco, D. (2002). *Sliding wear of austenitic and austenitic ferritic stainless steels. Metallurgical and Materials Transactions. A, vol. 33, no. 3, pp. 613–624. California, EE.UU.*

Universidad Politécnica Salesiana. (2011). *Prácticas de Metalografía. Laboratorio de Ciencias de Materiales. Cuenca, Ecuador.*

Villavicencio, C. (2014). *Diseño y optimización del sistema de producción: proceso de fabricación de la varilla de acero de la empresa ANDEC S.A. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.*

Zum, G. y Heinz, K. (1952). *Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series. Elsevier.*

Anexos

Anexo 1. *Información específica del espectrómetro utilizado.*

IMO
Imo Industries Inc.

Baird Corporation
Analytical Instruments Division
125 Middlesex Turnpike
Bedford, MA 01730-1468
617-276-6163
FAX: 617-276-6510
Telex: 6817303 BAIRD UW

Baird Europe B.V.
Produktieweg 30
2382 PC Zoeterwoude
The Netherlands
Tel: (071) 413151
FAX: (31) (71) 414899
Telex: 35498 BAIRD NL

Offices located in Germany, France, United Kingdom, Brazil, People's Republic of China, and Hong Kong. Sales and Service Representatives situated throughout the world.

PRINTED IN U.S.A. COPYRIGHT 1990 BAIRD CORPORATION

BAIRD SPECTROVAC 1000

ARC/SPARK OPTICAL EMISSION SPECTROMETER

Many Options for Enhanced Performance

- Dual spark stand for analysis of different materials, eliminating danger of cross-contamination.
- Economelt charge and melt software for more effective use and conservation of your materials, as well as significant dollar savings.
- Statistical Process Control (SPC)
- Baird LIMS Laboratory Information Management Systems.
- Alternative sources and sample stands for special analytical requirements.
- A comprehensive line of spares, standards, and accessories. Ask for our 175-page catalog.
- Automated robotic operation with the Baird Spectrobot system.
- Pneumatic sample holder.
- Soluble/insoluble element analysis in steels.
- Holders for a wide range of solid sample types, including flats, pins, wires, rods, and special holders for briquetted powders.

Specifications

Optics

Grating:	1440 grooves / mm blazed at 400 nm (first order)
Mounting:	Paschen-Runge
Focal length:	1.00 meter
Wavelength range:	173 nm to 384 nm second order 346 nm to 767 nm first order
Working resolution:	0.018 nm second order with normal exit slits; 0.006 nm second order with 10-micron exit slits
Linear dispersion:	0.33 nm/mm second order 0.66 nm/mm first order
Entrance slit:	25 microns
Slit locations:	190, pre-aligned
Detectors:	Hamamatsu photomultipliers, R427, R300, R889 small tubes
Maximum number of channels:	60

Electrical and environmental requirements

Spectrometer:	230 volts (± 10%), single phase, 50/60 Hz 3 wire, 15 amperes maximum
Computer:	230 or 115 volts, 50/60 Hz
Power:	2000 watts (typical)
Recommended relative humidity:	60% maximum
Recommended maximum temperature change:	2.8°C (5°F) per hour

Physical

Dimensions:	150 cm (59 in.) W by 124 cm (49 in.) D by 152 cm (60 in.) H
Weight:	341 kgs. (750 lbs.)

BAIRD: The Experts in Metals Analysis

Drawing upon years of experience with the metal-making industries, Baird's staff of spectroscopists, Q.C. experts, and engineers will assist you in solving your analytical problems and provide practical advice on improving your laboratory operations. When you own a Spectrovac 1000, you'll learn why the experts — including our users — are confident it will remain unchallenged as the perennial pace-setter in state-of-the-art analysis of metals.

IBM and PS/2 are registered trademarks of International Business Machines Corporation

Anexo 2. *Certificado de conformidad ARGON GAS UAP GRADO 5.0*

LABORATORIO DE GASES ESPECIALES / Specialty Gas Laboratory

Certificado de conformidad / *Certificate of conformity:*	Número de lote / *lot number:*	17112904
	Fecha de análisis / analysis *date:*	29 de noviembre de 2017
Cilindros / *Cylinders:*	N° de Página / *Number page:*	1 (de 1) / *1 (of 1)*

TIPO DE CILINDRO *Cylinder type*	CONEXIÓN DE VALVULA *Valve Connection*	PRESION DE LLENADO *Filling Pressure 15 °C*	VOLUMEN DE GAS *Gas volume 15 °C; 1.013 bar (a)*
Acero de carbón	CGA-580	200 bar	8 m3

ARGON GAS UAP GRADO 5.0

PUREZA / *purity:* 99.999%

Seriales de cilindros del lote / *Lot serial cylinders:*

540340	ENJ1114	384653-2	26694
D18960	196D	650633	12020414
AGF016	649924	459759	907276-9

COMPONENTES *Components*		ESPECIFICACIÓN *Order*	ANÁLISIS *Analysis results*	UNIDAD *Unit*
ARGÓN / *Argon*	Ar	99.999	99.999	%
HUMEDAD / *Moisture*	H2O	≤ 2	< 2	µmol/mol
OXÍGENO / *Oxygen*	O2	≤ 1	< 1	µmol/mol
NITRÓGENO / *Nitrogen*	N2	≤ 4	< 4	µmol/mol
THC / *Total Hydrocarbons*	CH4	≤ 1	< 1	µmol/mol
DÍOXIDO DE CARBONO / *Carbon dioxide*	CO2	≤ 1	< 1	µmol/mol

Método de preparación / *Preparation Method:*	Presiones parciales / Partial pressures
Temperatura recomendada de almacenamiento y uso / *Recommend storage and usage temperature:*	0 °C a 45 °C / 0 °C to 45 °C
Presion minima de uso / *Minimun pressure of use:*	3 bar (a)
Método analítico / *Analitical method:*	Paramagnético, celda electroquímica, cromatografía
Utilizar antes de / *Use before of:*	28 de noviembre de 2020
Comentarios / *Coments:*	1 µmol/mol corresponde a 1 ppm
Lugar de producción / *Production site:*	Linde Ecuador S.A. Planta de Gases Especiales Guayaquil, Km 11.5 Vía Daule

Ing. Qco. Víctor E. Vélez Bone
victor.velez@linde.com
Supervisor de Gases Especiales / *Specialty Gas Supervisor*
Telf.: +593 43703408 Ext. 4110 Celular +593 986745526, +593 985484645
Guayaquil - Ecuador

Anexo 3. *Bloque patrón para calibración del software espectrométrico: BCS/SS-CRM No. 465/1_Acero inoxidable AISI 304*

MAIN EDITION

BUREAU OF ANALYSED SAMPLES LTD

Directors:-
R. P. MEERES, *BA (Oxon), MRSC* (Managing)
G. C. FLINTOFT, *ACMA*
J. C. MEERES
M. S. TAYLOR, *PhD, CChem, MRSC*

BRITISH CHEMICAL STANDARD CERTIFIED REFERENCE MATERIAL

CERTIFICATE OF ANALYSIS
BCS†/SS‡-CRM No. 465/1
AUSTENITIC STAINLESS STEEL

Prepared under rigorous laboratory conditions and, AFTER CERTIFICATION ANALYSIS IN GREAT BRITAIN, issued by the Bureau of Analysed Samples Ltd.

CO-OPERATING ANALYSTS

INDEPENDENT ANALYST
1 GELDER, Mrs. J. E., *BSc*, MTS Midlands Ltd., Brierley Hill.
2 HASTINGS, J., Sheffield Testing Laboratories Ltd., Sheffield.
3 HEYWOOD, D. G., *AMet*, Pattinson & Stead, Middlesbrough.
4 KATZ, A.M., Alfred H. Knight International Ltd., St. Helens.
5 PAGE-GIBSON, J. E., *BSc, CChem, MRSC*, Ridsdale & Co. Ltd., Middlesbrough.

GOVERNMENT DEPARTMENT
6 FRYER, R. E. J., *BSc, PhD, CChem, MRSC*, Directorate of Quality Assurance/Technical Support, M.O.D., Woolwich.

ANALYSTS representing MANUFACTURERS and USERS
7 HANCOCK, R., *BMet, CEng, MIM*, Stocksbridge Engineering Steels, Sheffield.
8 HIRST. R., British Steel Technical, Swindon Laboratories, Rotherham.
9 DAY, R., Rotherham Engineering Steels, Rotherham.
10 JOWITT, R., British Steel Technical, Teesside Laboratories, Middlesbrough.

ANALYSES

Mean of 4 values - mass content in %.

Analyst No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al (Total)	B	Co	Cu	N	Ti	V	*Pb*
1	0.068	0.394	1.355	0.018	0.012	...	0.099	...	...	0.0005	0.051	0.096	0.010	0.39	0.090	*0.0005*
2	0.065	0.412	1.374	0.022	0.012	17.38	0.094	9.28	...	...	0.052	0.100	...	0.42	0.114	...
3	0.065	0.406	1.400	0.021	0.010	17.31	0.093	9.16	0.025	0.0004	0.053	0.100	0.010	0.38	0.099	*0.0004*
4	0.065	0.409	1.390	0.024	0.014	17.18	0.083	9.25	0.027	...	0.054	0.095	...	0.38	0.102	*0.0001*
5	0.066	0.409	1.395	0.020	0.009	17.22	0.091	9.28	0.025	0.0008	0.054	0.098	0.010	0.41	0.103	*0.0007*
6	0.067	0.408	1.379	0.022	0.013	17.40	0.103	9.23	0.029	...	0.056	0.096	...	0.42	0.092	*<0.0001*
7	0.066	0.401	1.371	0.021	0.012	17.32	0.085	9.25	0.026	0.0006	0.055	0.097	0.009	0.40	0.108	...
8	0.064	...	1.376	...	0.011	17.28	0.083	9.22	0.025	...	0.054	0.097	0.010	039	0.107	...
9	0.064	0.44	1.380	0.021	0.012	17.38	0.095	9.27	0.025	0.0006	0.051	0.101	0.011	0.40	0.105	...
10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0006	...	...	...	...	...	...
M_M	**0.066**	**0.405**	**1.380**	**0.021**	**0.012**	**17.31**	**0.092**	**9.24**	**0.026**	**0.0006**	**0.053**	**0.098**	**0.010**	**0.40**	**0.102**	...
s_M	0.002	0.006	0.014	0.002	0.002	0.08	0.008	0.04	0.002	0.0002	0.002	0.003	0.001	0.02	0.008	...

The above figures are those which each Analyst has decided upon after careful verification.

Figures in bold type certified, figures in small italic type only approximate.

M_M: Mean of the intralaboratory means. s_M: standard deviation of the intralaboratory means.

CERTIFIED VALUES (Cv)

mass content in %

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al (Total)	B	Co	Cu	N	Ti	V
Cv	**0.066**	**0.405**	**1.380**	**0.021**	**0.012**	**17.31**	**0.092**	**9.24**	**0.026**	**0.0006**	**0.053**	**0.098**	**0.010**	**0.40**	**0.102**
C(95%)	0.002	0.005	0.011	0.002	0.002	0.07	0.006	0.04	0.002	0.0002	0.002	0.002	0.001	0.02	0.006

The half width confidence interval C(95%) = $\frac{t \times s_M}{\sqrt{n}}$ where "t" is the appropriate two sided Student's t value at the 95% confidence level for "n" acceptable mean values

For further information regarding the confidence interval for the certified value see ISO Guide 35:2006 sections 6.1 and 10.5.2.

N.B. Due to slight segregation of certain elements an area 6mm in diameter in the centre of the disc samples should be avoided for emission spectroscopy.

Page 1 of 2

Anexo 4. *Datos obtenidos por el software del espectrómetro.*

Analyze Standardize Edit Transfer Options Quit

Sample : Ensayo espectrometrico - AISI 304 - muestra 2 | Time : 03:57:03
Alloy : INOX Mode : PA | Date : 07-19-04

Element		Burn 2	Burn 3	Burn 4	Burn 5	Average
Fe	(%)	70.993	71.241	70.619		70.955
C	(%)	0.149	0.154	0.139		0.150
Si	(%)	0.407	0.391	0.398		0.401
Mn	(%)	> 1.884	> 1.884	> 1.884		> 1.884
P	(%)	> 0.060	> 0.060	> 0.060		> 0.060
S	(%)	< 0.010	< 0.010	< 0.010		< 0.010
Cr	(%)	17.408	17.264	17.594		17.421
Mo	(%)	0.132	0.129	0.130		0.131
Ni	(%)	7.949	7.952	7.973		7.969
Al	(%)	0.021	0.019	< 0.017		0.018
Co	(%)	0.120	0.113	0.123		0.118
Cu	(%)	0.102	0.097	0.109		0.102
Ti	(%)	< 0.041	< 0.041	< 0.041		< 0.041
V	(%)	> 0.122	0.117	> 0.122		> 0.122

F2-Next sample F4-Print F9-Menu F10-Burn DEL-Delete

Anexo 5. *Tabla de tiempos para el encapsulado de probetas.*

			Time					
			1" Mold 25 mm		1,25" Mold 25 mm		1,5" Mold 25 mm	
Materials	Temperarture	Pressure	Powder	Premold	Powder	Premold	Powder	Premold
Phenolic Resin	270° - 300°F (132° - 149°C)	4200 PSI	5 min	3 – 4 min	7 min	5 – 6 min	9 min	7 – 8 min
Diallyl Phthalate	280° - 290°F (138° - 149°C)	3000 PSI	7 – 8 min	-	9 – 10 min	-	11 – 12 min	-
TransOptic	285° - 300° (140° - 149°)	3000 PSI	4 min	-	6 min	-	6 min	-
Heating Cycle	Room Temp to 280° - 300°F (132° - 149°C)	100 PSI	Approximately 20 minutes					
Cooling Cycle	270° - 300°F (132° - 149°C)	4200 PSI	Approximately 20 minutes					

Anexo 6. *Espectrómetro "BAIRD Spectrovac 1000"*

Anexo 7. *Cortadora de Precisión "BUEHELER – Isomet 1000 – precisión SAW"*

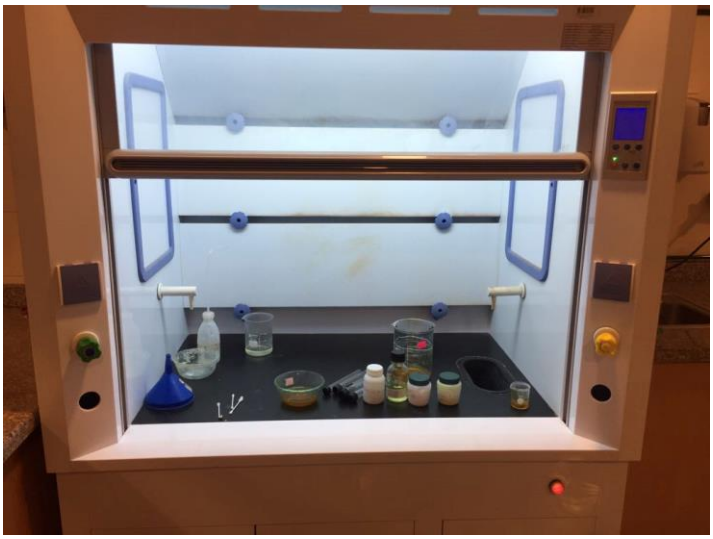
Anexo 8. *Encapsuladora de Probetas "BUEHELER – Simplimet – mounting press"*

Anexo 9. *Pulidora Manual "BUEHELER – Handimet 2 Roll Grinder"*

Anexo 10. P*ulidora Automática "BUEHELER – Metaserv 250 – Grinder Pousher"*

Anexo 11. *Balanza de Exactitud "METTLER TOLEDO MS"*

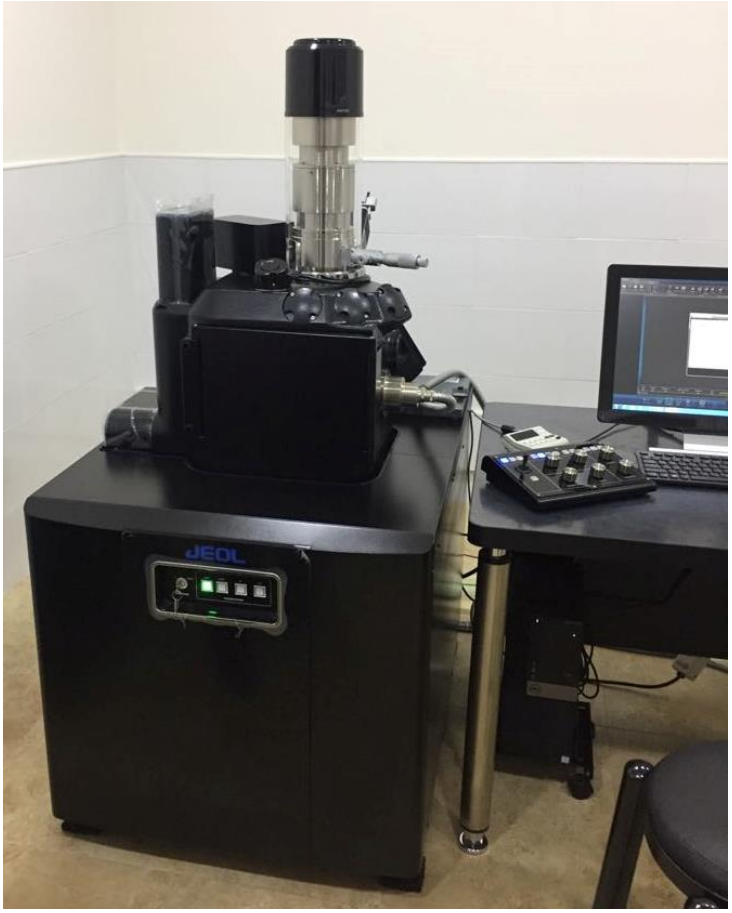
Anexo 12. *Fume Hood "BIOBASE FH1200(p)"*



Anexo 13. *Limpiador Ultrasónico "BUEHLER UltraMet 2002"*

Anexo 14. *Microscopio Óptico Invertido "NIKON ECLIPSE MA 100"*

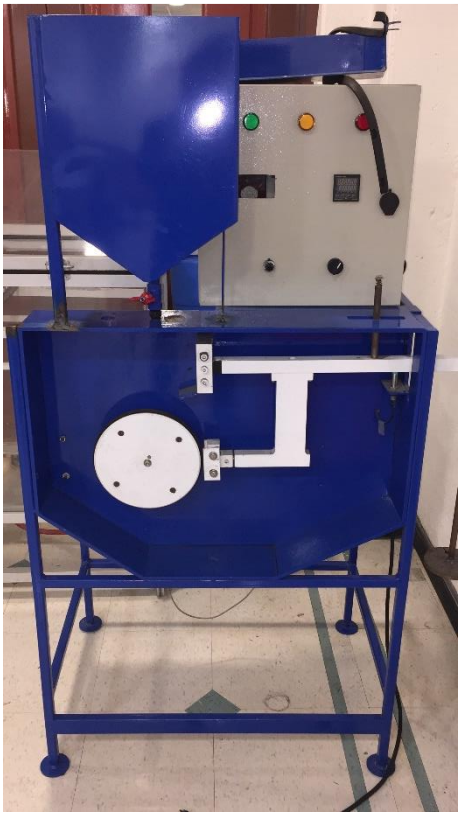
Anexo 15. *Microscopio Electrónico de Barrido "JEOL JSM-IT300LA"*



Anexo 16. *Thermal Spray "TAFA Model 8830 Arc Spray Gun Operator's Manual, UPS"*

Anexo 17. *Microdurómetro Vickers "Wilson Hardness 432SVD"*

Anexo 18. *Equipo para ensayo de desgaste abrasivo*



Anexo19. *Alambre "Praxair and TAFA Arc Spray 13% Chrome Steel Wire - 60T"*

Technical Data

Bulletin

Praxair Surface Technologies
1555 Main Street
Indianapolis, IN 46224

Praxair Surface Technologies
TAFA Incorporated
146 Pembroke Road
Concord, NH 03301

File: 1.9.1.2-60T
Issue: 010624
Supercedes: K10320

Praxair and TAFA Arc Spray 13% Chrome Steel Wire - 60T

Material Review:

Made exclusively for arc spraying. Characteristics of the coating are its excellent wearing quality and fair resistance to corrosion. It is excellent all-purpose steel for basic machine element work.

Arc Spray 60T Chrome Steel wire can be sprayed with any Praxair and TAFA Arc Spray gun.

Arc Spray 60T Chrome Steel wire meets Department of Defense Specification MIL-W-6712C, Table I, Stainless Steel, Chrome and Rolls Royce's MSRR 9507/103 Specification.

CAUTION: All Praxair and TAFA wires have been optimized for arc spraying. Use of alternate wires usually cause problems such as excessive tip wear, spitting and feeding problems. We only recommend Praxair and TAFA Certified wires.

Application Review:

This is by far the most widely used reclamation spray wire because of its wear resistance and low shrink. Recommended when a hard coating requiring some corrosion resistance is desired. The high chrome content provides fair high temperature oxidation resistance and provides a fair amount of corrosion protection.

In addition, the chrome steel serves as an electrical resistance coating. Successful shop applications have been resurfaced journal sections, cylinder liners, pistons, crankshaft bearings, hydraulic rams, and numerous other machine elements.

Some electrical power stations use only this steel for repair work.

Composition:	
Carbon	0.3
Phosphorus	Trace
Sulphur	Trace
Manganese	1.0
Nickel	1.0
Chromium	12/14
Silicon	0.08
Iron	Balance
Coating Physical Properties	
Wire Size	1/16" (1.6 mm)
Deposit Efficiency	78 Percent*
Melting Point	2600°F (1427°C) (approx.)
Bond Strength	4730 psi (32.6 MPa)
Coating Texture (as sprayed)	Variable** (see next page)
Finish Texture (ground)	6-15 Microinches aa **
Hardness	R_{15n} 80-82 (R_c 40-43) Converted
Coating Density	6.74 gm/cc**
Coating Weight	0.035 lbs/ft^2/mil
Shrink	0.0018 in/in (cm/cm)
Coefficient of Thermal Expansion	6.6 x 10-^{7} in/in °F (1000°F)
Spraying (inert chamber with argon):	
Spray Rate	10 lbs/hr/100 amps (4.5 kg/hr/100 amps)
Coverage (wire consumption)	0.8 oz/ft^2/0.001" (0.98 kg/m^2/100 microns)
Spray Pattern**(approximate 8" standoff)**	Cross Nozzle/Positioner - 1" (2.5 cm) vertical height x 1-3/4" (4.4 cm) width Slot Nozzle/Positioner - 2" (5 cm) vertical height x 1" (2.5 cm) width
Length of wire per lb	96 ft. (1/16")

* Depends on air pressure, standoff, nozzle cap and target size.

** 6" standoff, 40 psi - 8830, depends on air pressure - fine with high psi, average with medium psi, and rough with low psi.

*** For higher hardness increase air pressure to 60 psi or higher do this only in final passes where wear will occur.

**** Higher air pressures, smaller wire (1/16), and lower amperage with red nozzle cap gives smallest

Spraying Procedure:

Coating Type				
	Normal 8830/8835	Arc Jet 8830/8835	Arc Jet 9000	9000
Atomizing Air Pressure:Primary Secondary	50[c] ---	50[c] 40[c]	60[c] 60[c]	60[c] ---
Nozzle Cap	Blue	*	Green	Green
Nozzle/Positioner	Short Cross	**	Long Cross	Long Cross
Arc Load Volts[a]	29-30	29-30	30-32	30-32
Amps[b]	50-300	50-300	50-300	50-300
Standoff Inches	5-7	3-5	3-5	5-7
Coating Thickness/Pass-mils	5	5	5	5
Coating Texture-microinches aa	200-350	150-250	150-250	200-350

Anexo20. *Alambre "Praxair and TAFA Arc Spray BondArc® Wire75B®"*

Technical Data

Bulletin

Praxair Surface Technologies
1555 Main Street
Indianapolis, IN 46224

Praxair Surface Technologies
TAFA Incorporated
146 Pembroke Road
Concord, NH 03301

File: 1.9.1.2-75B
Issue: L11111
Supercedes: K10328

Praxair and TAFA Arc Spray BondArc® Wire75B®

Material Review:

BondArc 75B wire, a unique nickel-aluminum alloy for use in arc spray systems, is available from Praxair and TAFA on an exclusive license under U.S. Patent No. 4,027,367 and corresponding foreign patents. Tradenamed BondArc, the pre-alloyed wire produces superior bond coats that are dense and resistant to high temperature oxidation, thermal shock and abrasion. The material is equally suitable as a one-coat system; for example, a finish of 5 microinch is attainable. BondArc wire is manufactured exclusively for wire arc spraying. The unusual self-bonding ability of the alloy is attributed to the exceptionally high temperatures the nickel-aluminum reaches and which on impact with the base material, diffuses to form a metallurgical bond. Measured bond strengths have been determined to be 55 percent higher than those formed by exothermic reactions of nickel and aluminum mixtures -- the previous materials available to demonstrate such self-bonding characteristics. One of the major problems in achieving high quality, well-bonded coatings in any thermal spray process is the costly, extensive preparation of the substrate. BondArc alloy eliminates the problem. The coating, through extensive testing, has also been found to be superior to exothermic materials in sharp edge and impact loading.

BondArc wire is self-bonding to a broad range of smooth metal surfaces including annealed or hardened carbon steels, annealed or hardened alloy steels, stainless steels, aluminum, nickel, cast iron, titanium and tantalum. It is not self-bonding to copper-based alloys or tungsten. BondArc wire does not exhibit the same self-bonding characteristics when sprayed with a conventional combustion flame or when rendered into powders and applied by plasma spray apparatus. BondArc 75B wire can be sprayed with any Praxair and TAFA arc spray gun.

BondArc 75B meets the following specifications PWA-36937 (PWA 271-37 Rev D), GE Manual operation number 70-49-38 as an alternate to 70-49-10, Avco M3951B, Rolls Royce OMAT #3/229, SNECMA DMR33-011, Garrett FP5045 and BF Goodrich Service Letter 1623.

CAUTION: All Praxair and TAFA wires have been optimized for arc spraying. Use of alternate wires usually cause problems such as excessive tip wear, spitting and feeding problems. We only recommend Praxair and TAFA certified wires.

Application Review:

Arc spray coatings from 0.004 to 0.006 inch (0.01 to 0.015 mm) can be readily applied in one pass. Thicker coatings up to 0.250 inch (6.3 mm) have been applied by continuous spraying. Thus, in some cases, BondArc can be used as a one-coat system. BondArc coatings can be machined to a rough finish with tungsten carbide tools or ground to smooth finish with aluminum oxide or silicon carbide wheels. BondArc wire can be sprayed directly on a smooth, chemically clean surface without conventional blasting, turning or roughening, thereby, eliminating the need for expensive preparation equipment and the associated labor and quality control. However, where possible, the surface should be prepared by rough cutting (thread), rough grinding, grit blasting (24 mesh steel shot or aluminum oxide at 80 psig pressure blast) or using a clean coarse emery cloth since this increases bond strength by an additional 600 psi. In any case, note that the surface to be sprayed must be clean, freshly exposed metal. Since BondArc coatings look like stainless steel, it is cosmetically acceptable to many end users as a finish coat.

Typical properties of the Praxair and TAFA nickel-aluminum arc spray coating when sprayed on a clean but unroughened (unprepared) steel surface include: bond strength - 9100 psi; with a typical coating hardness of 55-80 R_b.

Composition: (Typical)	
Nickel	95 percent
Al	5 percent
Coating Physical Properties	
Wire Size	1/16 in (1.6 mm)
Deposit Efficiency	70 Percent
Melting Point	2642°F (1450°C)
Bond Strength Tensile[a]	9,100 psi clean surface (62.8 MPa) 9,750 psi blasted surface (67.2 MPa)
Coating Texture (as sprayed)	Variable[b] (see next page)
Hardness	55-80 R_b
Coating Density	7.8 gm/cc[c]
Coating Weight	0.038 lbs/ft^2/mil
Magnetic Properties	Non-magnetic, slight magnetic susceptibility
Abrasion Resistance	Good
Impact, Sharp Edge and Bend Resistance	Excellent
Coefficient of Thermal Expansion	7x10^{-6} in/in°F (1000°F)
Electrical Resistivity	200 micro ohm cm (appropriate)
Heat Resistance	Good[d]
Spraying:	
Spray Rate	10 lbs/hr/100 amps (4.5 kg/hr/100 amps)
Coverage (wire consumption)	0.9 oz/ft^2/0.001 in (1.10 kg/m^2/100 microns)
Spray Pattern[e] **(approximate 8 in standoff)**	Cross Nozzle/Positioner - 1 in (2.5 cm) vertical height x 1 3/4 in (4.4 cm) width Slot Nozzle/Positioner - 2 in (5 cm) vertical height x 1 in (2.5 cm) width
Length of wire per lb	84 ft. (1/16 in)

a Values are for steel substrates according to ASTM C633-69. For bond strengths on other substrate materials, see Figures 1, 2 and 3 on Page 2 and also Bulletin 1.9.1.2-75B.1.

b 6 inch standoff, 40 psi - 8830, depends on nozzle cap, air pressure - fine with high psi, average with medium psi, and rough with low psi.

c Density depends on air pressure - 80 percent "Bond Coat" setting, 90 percent subsequent buildup.

d No evident nickel alloy/substrate scaling with 0.020 inch coating after:

Five days	@	1000°F
Three days	@	1800°F
15 minutes	@	2200°F

e Higher air pressures, smaller wire (1/16), and lower amperage with red nozzle cap gives smallest diameter pattern.

Spraying Procedure:

Coating Type				
	Normal 8830/8835	Arc Jet 8830/8835	Arc Jet 9000	9000
Atomizing Air Pressure:Primary Secondary	50[c] ---	50[c] 40[c]	60[c] 60[c]	60[c] ---
Nozzle Cap	Green	*	Green	Green
Nozzle/Positioner (Cross=C; Slot=S)	Long C	**	Long C	Long C
Arc Load Volts[a]	30	30	30	30
Amps[b]	100-300	100-300	100-300	100-300
Standoff Inches	5-7	3-6	3-6	5-7
Coating Thickness/Pass-mils	5	5	5	5
Coating Texture-microinches aa	200-350	150-250	150-250	200-350

Anexo21. *Alambre "Praxair and TAFA 140 MXC^{TM} Nano Composite Wire"*

Technical Data

Bulletin

Praxair Surface Technologies
1555 Main Street
Indianapolis, IN 46224

Praxair Surface Technologies
TAFA Incorporated
146 Pembroke Road
Concord, NH 03301

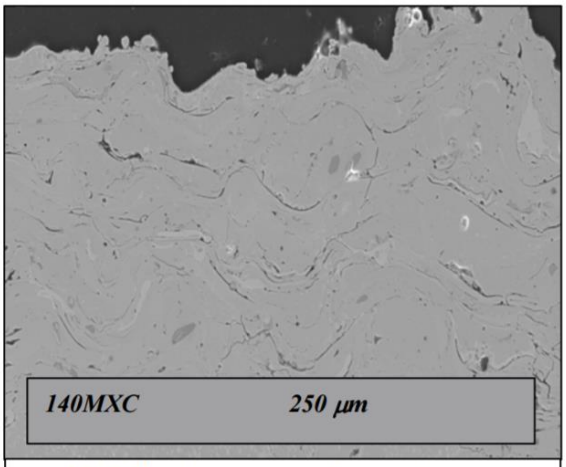
File: 1.9.1.2-140MXC
Issue: V10508
Original

Praxair and TAFA *140MXC*^{TM} Nano Composite Wire

Material review:

Praxair and TAFA 140*MXC* nano composite wire is a unique material specifically developed for superior coatings utilizing the latest in arc spray equipment and material technology. The 140*MXC* wire is part of a Praxair and TAFA development program into new thermal spray wires for arc spray coatings, which contain a mixture of nanocrystalline and amorphous phases.

The 140*MXC* wire sprayed at optimized parameters generate high quality coatings, characterized with low porosity, high hardness, exceptionally superior wear resistance, good corrosion protection, and homogeneous particle distribution.



140*MXC* Nano Composite Wire, Arc Sprayed with the *CoArc*^{TM} Arc Spray System. SEM Micrograph, Scanning Electron Microscope, Hitachi S 35000N, High Vacuum mode, Accelerating Voltage: 10kV

CAUTION: All Praxair and TAFA wires have been optimized for arc spraying. Use of alternate wires usually causes problems such as excessive tip wear, spitting and feeding problems. We only recommend Praxair and TAFA certified wires.

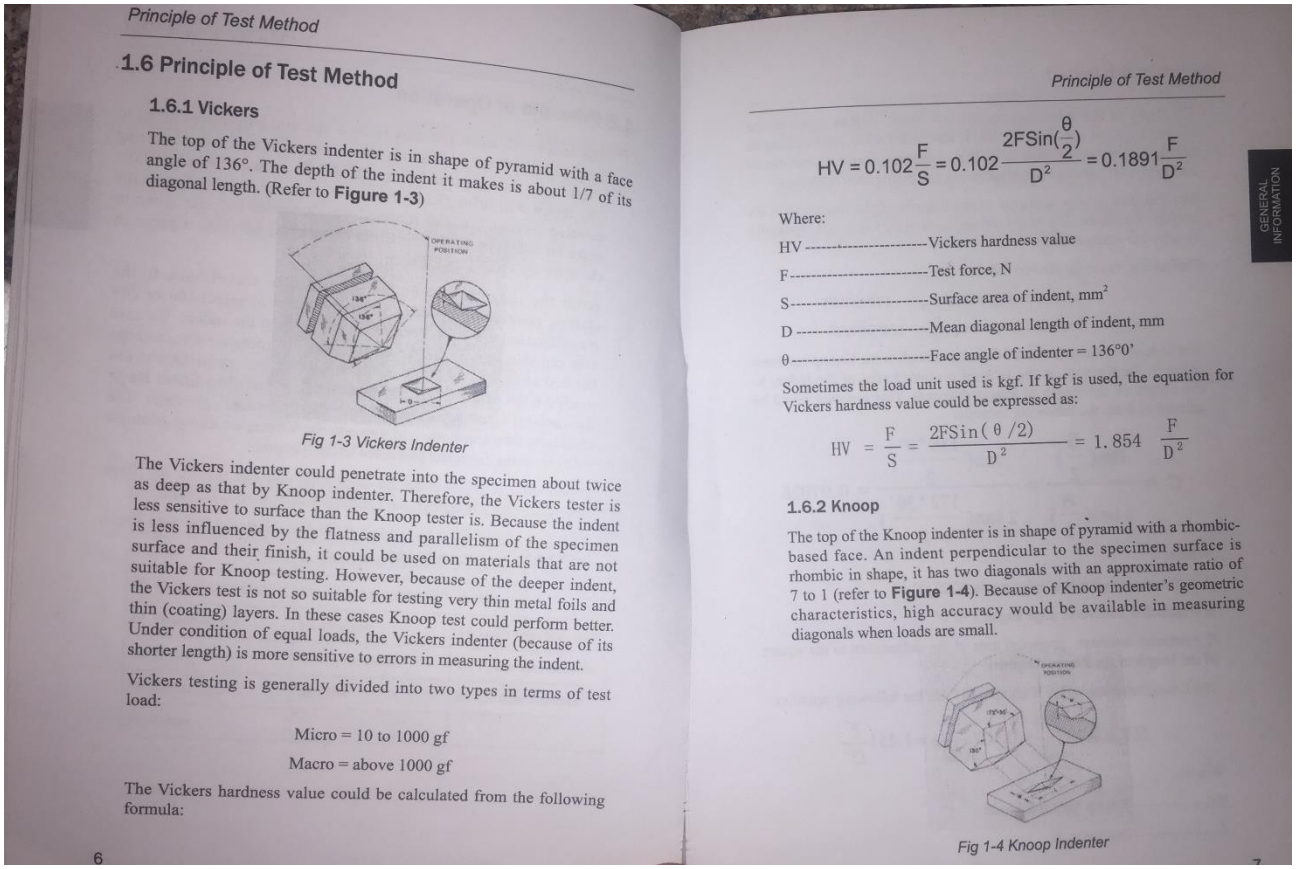
Composition:	
Element	**Nominal %**
Chromium	< 25
Boron	< 5
Molybdenum	< 6
Tungsten	< 15
Manganese	< 3
Carbon	< 4
Niobium	< 12
Silicon	< 2
Iron	Balance
Coating Physical Properties:	
Wire Size	1/16 in
Deposit Efficiency	80 percent*
Melting Point	2200 F (1200°C) (approx.)
Bond Strength	6000 - 8000
Coating Texture (as sprayed)	450 – 650
Hardness (DPH_{300g})	890 – 1100
Coating Density	7.8 gm/cc**
Corrosion Resistance	Excellent
Wear Resistance	Excellent
Spraying	
Spray Rate	7.5 lbs/hr/100 amps (3.6 kg/hr/100 amps)
Coverage (wire Consumption)	0.7 oz/ft^2/0.001"
Spray Pattern (approximate 4" standoff)	2.5 " (6.35 cm)
Length of wire per lb	122 ft. (1/16")

* Depends on air pressure, standoff distance, nozzle cap, and target size
** Depends on atomizing air pressure

Spraying Procedure:

Coating Type					
	Normal 8830/8835	*ArcJet®* 8830/8835	Normal 9000	*ArcJet* 9000	*CoArc™* 9935
Atomizing Air Pressure, Primary Secondary	50 – 75 ---	50 40	50 – 75 ---	60 40	60 – 70 ---
Nozzle Cap	Green	---	Green	Green	Green
Nozzle/Positioner	Long C	---	Long C	Long C	---
Arc Load Volts	29 - 32	29 – 32	36	36	27 - 32
Current, Amps	175	175	175	175	175
Standoff Inches	4	4	4	4	4
Coating Thickness/Pass-mil	1.2 - 1.3	1.2 - 1.3	1.3	1.3	1.5
Coating Texture-microinches	500 - 650	550 – 600	550 - 700	550 - 700	450 - 600

Anexo22. *Patrón del indentador*



Principle of Test Method

1.6 Principle of Test Method

1.6.1 Vickers

The top of the Vickers indenter is in shape of pyramid with a face angle of 136°. The depth of the indent it makes is about 1/7 of its diagonal length. (Refer to **Figure 1-3**)

Fig 1-3 Vickers Indenter

The Vickers indenter could penetrate into the specimen about twice as deep as that by Knoop indenter. Therefore, the Vickers tester is less sensitive to surface than the Knoop tester is. Because the indent is less influenced by the flatness and parallelism of the specimen surface and their finish, it could be used on materials that are not suitable for Knoop testing. However, because of the deeper indent, the Vickers test is not so suitable for testing very thin metal foils and thin (coating) layers. In these cases Knoop test could perform better. Under condition of equal loads, the Vickers indenter (because of its shorter length) is more sensitive to errors in measuring the indent.

Vickers testing is generally divided into two types in terms of test load:

Micro = 10 to 1000 gf

Macro = above 1000 gf

The Vickers hardness value could be calculated from the following formula:

6

Principle of Test Method

GENERAL INFORMATION

$$HV = 0.102\frac{F}{S} = 0.102\frac{2F\sin(\frac{\theta}{2})}{D^2} = 0.1891\frac{F}{D^2}$$

Where:

HV ----------Vickers hardness value

F----------Test force, N

S----------Surface area of indent, mm^2

D ----------Mean diagonal length of indent, mm

θ----------Face angle of indenter = 136°0'

Sometimes the load unit used is kgf. If kgf is used, the equation for Vickers hardness value could be expressed as:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{2F\sin(\theta/2)}{D^2} = 1.854\ \frac{F}{D^2}$$

1.6.2 Knoop

The top of the Knoop indenter is in shape of pyramid with a rhombic-based face. An indent perpendicular to the specimen surface is rhombic in shape, it has two diagonals with an approximate ratio of 7 to 1 (refer to **Figure 1-4**). Because of Knoop indenter's geometric characteristics, high accuracy would be available in measuring diagonals when loads are small.

Fig 1-4 Knoop Indenter

7

- *Patrón = 497,0 HV_3*

- *Diagonal 1 = 107,143 μm*
- *Diagonal 2 = 105,755 μm*

- $Diagonal_{eq.} = 107{,}143\ \mu m + 105{,}755\ \mu m = 212{,}898\ \mu m\ /\ 2 = 106{,}449\ \mu m$

$$106{,}449\ \mu m \approx 0{,}106449\ mm$$

- *Fuerza = 29,42 N*

- El valor de la dureza de Vickers se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$HV = 0{,}1891 * \frac{F}{(Diagonal_{eq.})^2}$$

$$HV = 0{,}1891 * \frac{29{,}42\ N}{(0.106449)^2} = 490{,}96\ HV_3$$

Anexo23. *Registro fotográfico microdureza Vickers, muestra 1, 2, 3 y 4.*