



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Diseño y elaboración de los bloques comparadores (latón y acero) con recubrimientos de níquel-cromo agrietado, para evaluar la técnica de líquidos penetrantes”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERÍA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTAN:
EDITH PAMELA LARIOS LÓPEZ
VIANEY RODRÍGUEZ ZEPEDA

TUTOR: M EN I. ITZEL REYES CHAPARRO
ASESOR TÉCNICO: M EN I. J FERNANDO FLORES
ÁLVAREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Profesor: Aramburo Pérez Gerardo

VOCAL: Profesor: Flores Cedillo Osvaldo

SECRETARIO: Profesor: Reyes Chaparro Itzel

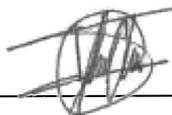
1er. SUPLENTE: Profesor: Flores Álvarez José Fernando

2° SUPLENTE: Profesor: Ruiz Ramírez Agustín

SITIO DONDE SE DESARROLLA EL TEMA:

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Metalurgia

ASESOR DEL TEMA:



M en I. Itzel Reyes Chaparro

SUPERVISOR TÉCNICO:



M en I. J Fernando Flores Álvarez

SUSTENTANTE (S):



Vianey Rodríguez Zepeda



Edith Pamela Larios López

Agradecimiento

En primer lugar, deseamos expresar nuestro agradecimiento a la directora de esta tesis, M en I Itzel Reyes Chaparro y a nuestro asesor M en I J. Fernando Flores Álvarez por la dedicación, apoyo y amistad que nos han brindado en este trabajo, que nos permitieron aprender mucho más que lo estudiado en el proyecto y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde el inicio de este proyecto.

Asimismo, agradecemos a los profesores del Departamento de Metalurgia por su apoyo, especialmente al M en M. Aramburo Pérez Gerardo, por su orientación y atención a nuestras consultas sobre metodología.

Mi agradecimiento al Dr. Bernardo F. Campillo Illanes por el apoyo con el proyecto PAPIIT IT-102619 “Caracterización microestructural y mecánica de un acero de ultra-alta resistencia (UHSS) modificado con Mo y V” por apoyo en consumibles y reactivo, así como al Ing. Daniel Javier Hinojosa Vega por apoyar tanto en proyecto como en taller mecánico.

Gracias anticipadas a M en C Raúl Gilberto Valdez Navarro y al Dr. Arturo Barba Pingarrón por el apoyo recibido en el uso del equipo para sand-blasting y para las pruebas de medición de rugosidad y a I.Q, Iván Puente Lee por el apoyo brindado en las pruebas de Microscopia Electrónica de Barrido

Finalmente, gracias a mi amiga y compañera de este proyecto, hoy culminan esta maravillosa aventura y no puedo dejar de recordar cuantas tardes y horas de trabajo nos juntamos a lo largo de este proyecto. Hoy nos toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de vida y no puedo dejar de agradecerte por tu apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles, por compartir horas de estudio. Gracias por estar siempre ahí, lo logramos.

Resumen

Los bloques patrón son herramientas de representación física de una unidad de medición, las placas recubiertas de Ni-Cr se utilizan para la evaluación rutinaria de tintas penetrantes coloreadas y/o fluorescentes y pueden ser consideradas como unidades de medición.

El recubrimiento de níquel-cromo (Ni-Cr) es realizado mediante métodos de deposición electrolíticos, que consisten en depositar capas delgadas de metal, sobre la superficie metálica con un acabado superficial y es sumergida en una solución que contenga los iones metálicos que se quieran depositar (en este caso Ni-Cr)

Los paneles de prueba tipo I (de latón) con recubrimiento de níquel-cromo agrietado, contienen fallas que caen dentro de un rango de magnitudes cercanas al límite de la habilidad de la inspección por líquidos penetrantes para revelarlas, por lo que son usados para evaluar la funcionalidad de la detección de fallas de un sistema, ya que pueden proporcionar resultados cualitativos, por la comparación lado por lado, así como la evaluación de la funcionalidad del revelador. Con estos bloques es posible comparar un sistema de inspección con otro, de forma secuencial.

A estos bloques se les realizan grietas transversales mediante un ensayo de tensión con la finalidad de inducir fisuras controladas en los patrones de latón con depósitos Ni-Cr y ser evaluadas mediante la técnica de líquidos penetrantes para la medición de defectos en la superficie de los bloques, para simular condiciones que se pueden extrapolar a la industria.

Los paneles de prueba tipo II (de acero) con recubrimiento Ni-Cr, poseen diferentes acabados superficiales, así como defectos producidos mediante indentaciones a diferentes cargas aplicadas; las áreas con diferentes acabados superficiales se usan para verificar la capacidad de enjuague del penetrante. Estos paneles se utilizan para monitorear y controlar el proceso de prueba, y no para determinar la sensibilidad del equipo de prueba.

Contenido

1. Introducción.....	1
2. Justificación.....	1
3. Hipótesis	1
4. Objetivos	2
5. Antecedentes teóricos.....	2
5.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	2
5.2 LÍQUIDOS PENETRANTES	3
5.2.1 Principio del método	3
5.2.2 Propiedades físicas de los penetrantes	4
5.2.3 Técnica de inspección	5
5.3 SUSTRATO	8
5.4 BLOQUES PATRÓN	8
5.4.1 Bloque patrón tipo I: con superficie de níquel-cromo agrietado	9
5.4.2 Bloque patrón tipo II: bloque comparador con indentaciones superficiales.....	10
5.5 RECUBRIMIENTO DE NÍQUEL O NIQUELADO	10
5.6 CROMADO O RECUBRIMIENTO DE CROMO	12
5.7 PREPARACIÓN SUPERFICIAL.....	16
5.7.1 Pulido.....	17
5.7.2 Desengrase	17
5.7.3 Decapado	17
5.7.4 Sand-blasting.....	18
5.8 RUGOSIDAD	18
5.8.1 Perfil de rugosidad.....	19
5.9 ENSAYO DE TENSIÓN.....	20
5.9.1 Zona elástica	21
5.9.2 Zona plástica	21
5.10 TRATAMIENTO TÉRMICO	22
5.10.1 Normalizado.....	22
5.11 DUREZA.....	23
5.11.1 Microdureza Vickers	23
5.12 ESPECTROSCOPÍA DE EMISIÓN ÓPTICA	24
5.13 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	24
5.14 MEDICIÓN DE ESPESORES POR ULTRASONIDO	25
6. Metodología	25
6.1 BLOQUE PATRÓN TIPO I Y II.....	25
6.1.1 Preparación los sustratos (Latón y Ac. Inoxidable 316L)	25
6.1.2 Sand-blasting.....	26
6.1.3 Perfil de rugosidad.....	27
6.1.4 Caracterización metalográfica	28
6.1.5 Recubrimientos.....	29
6.1.6 Tratamiento térmico.....	35

6.1.7 Dureza	36
6.1.8 Ensayo de tensión	38
6.1.9 Microscopía electrónica de barrido	39
6.1.10 Líquidos penetrantes	40
7. Resultados	43
7.1 BLOQUE I	43
7.1.1 Composición química.....	43
7.1.2 Caracterización Metalográfica	44
7.1.3 Recubrimientos.....	44
7.1.4 Espesores del sustrato con recubrimiento	46
7.1.5 Microscopía electrónica de barrido	47
7.1.6 Ensayo de tensión	49
7.1.7 Líquidos penetrantes	51
7.2 BLOQUE II	54
7.2.1 Caracterización metalográfica	54
7.2.2 Recubrimientos.....	55
7.2.3 Espesores del sustrato con recubrimiento.....	57
7.2.4 Tratamiento térmico y Dureza.....	58
7.2.5 Ensayo de tensión	62
7.2.6 Microscopía electrónica de barrido	64
7.2.7 Líquidos penetrantes	65
8. Conclusiones.....	73
9. Anexos	73
9.1 ANEXO I. CÁLCULOS PARA LOS BAÑOS ELECTROLÍTICOS.....	73
9.2 ANEXO II. . GRÁFICOS DE RUGOSIDAD VS LONGITUD 0.8X5	74
10. Referencias bibliográficas.....	75

Índice de tablas

Tabla 1. Composición y condiciones del baño de watts con sulfato de níquel.	11
Tabla 2. Composición y condiciones de baño de cromo.	13
Tabla 3. Espesores de recubrimientos de níquel-cromo sobre Cu (μm).[19]	15
Tabla 4. Espesores de recubrimientos de níquel-cromo en Fe (μm).[19].....	16
Tabla 5. Composición química teórica de latón C26000 según norma ASTM B36.[35]	28
Tabla 6. Composición química teórica de acero inoxidable 316L según norma ASTM A 240/a 240M.[36]	29
Tabla 7. Condiciones de las indentaciones del bloque patrón con recubrimiento Ni- Cr de 5 min.	37
Tabla 8. Condiciones de las indentaciones del bloque patrón con recubrimiento Ni- Cr de 7 min.	37
Tabla 9. Composición química experimental del sustrato de latón mediante espectrometría de emisión óptica (OES).	43
Tabla 10. Valores promedio de los espesores de las placas sin recubrimiento, con recubrimiento de Ni y recubrimiento de Cr para 5 y 7 minutos.	46
Tabla 11. Composición química experimental del sustrato de acero 316L mediante espectrometría de emisión óptica (OES).	55
Tabla 12. Valores promedio de los espesores sin recubrimiento, con recubrimiento de Ni y recubrimiento de Cr para 5 y 7 minutos.....	58
Tabla 13. Curva de calibración de carga de trabajo.	59
Tabla 14. Valores promedio de dureza HV.	60
Tabla 15. Dimensiones de las indentaciones del bloque patrón 2 (5 min) antes y después de la aplicación de líquidos penetrantes.	66
Tabla 16. Dimensiones de las indentaciones del bloque patrón 4 (7 min) antes y después de la aplicación de líquidos penetrantes	68
Tabla 17. Valores promedio de rugosidad.....	70

Índice de figuras

<i>Figura 1. Bloque patrón tipo i agrietado.</i>	9
<i>Figura 2. Bloque patrón tipo ii.</i>	10
<i>Figura 3. Curva esfuerzo-deformación.[26]</i>	21
<i>Figura 4. Punta de durómetro para ensayo de microdureza vickers.</i>	23
<i>Figura 5. Cizalladora.</i>	26
<i>Figura 6. Medición de espesores con ultrasonido dms go+ en el sustrato de acero inoxidable 316L.</i>	26
<i>Figura 7. Medición de espesores con ultrasonido dms go+ en el sustrato de latón.</i>	26
<i>Figura 8. Granalla de óxido de aluminio.</i>	27
<i>Figura 9. Sand-blasting sobre placa de acero 316L.</i>	27
<i>Figura 10. Rugosímetro mitutoyo sj-30.</i>	27
<i>Figura 11. Cuba de baño ultrasónico para placas.</i>	29
<i>Figura 12. Inmersión de sustratos con recubrimiento de ni en sulfato de cobre ($cuSO_4$) 1.18 m.</i>	30
<i>Figura 13. Calentamiento de solución de baño de níquel.</i>	30
<i>Figura 14. Montaje para los recubrimientos de ni, fuente de poder, celda hull de acrílico con ánodo de ni y el sustrato como cátodo.</i>	31
<i>Figura 15. Sustrato de latón con recubrimiento de níquel.</i>	31
<i>Figura 16. Sustrato de acero inoxidable con recubrimiento de níquel.</i>	31
<i>Figura 17. Medición del espesor de recubrimiento de níquel por inspección por ultrasonido dns go+ a los sustratos de latón.</i>	31
<i>Figura 18. Cuba de baño ultrasónico para placas de aceros.</i>	32
<i>Figura 19. Inmersión de sustratos con recubrimiento de ni en sulfato de cobre ($cuSO_4$) 1.18 m.</i>	32
<i>Figura 20. Calentamiento de solución de baño de cromo.</i>	33
<i>Figura 21. Montaje para los recubrimientos de cr, fuente de poder, celda hull de acrílico con ánodo de cr y cátodo de latón.</i>	34
<i>Figura 22. Bloque patrón de latón con recubrimiento de ni-cr.</i>	34
<i>Figura 23. Medición del espesor de recubrimiento de cromo por inspección por ultrasonido dms go+ a los bloques patrón de latón.</i>	34
<i>Figura 24. Bloque patrón de acero 316L con recubrimiento de ni-cr.</i>	35
<i>Figura 25. Medición del espesor de recubrimiento de cromo por inspección por ultrasonido dms go+ a los bloques patrón de acero 316L.</i>	35

<i>Figura 26. Bloques patrón con tratamiento térmico, a) bloque 1 con 5MIN, b) bloque 2 con 5 min, c) bloque 4 con 7 min y d) bloque 5 con 7MIN.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 27. Mufla barnstead thermolyne.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 28. Micro durometro shimadzu (hmv).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 29. Huella en hmv.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 30. Bloques patrón comparadores de indentaciones, a) bloque 2 y b) bloque 4</i>	<i>38</i>
<i>Figura 31. Buehler hardness rockwell tester.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 32. Posición del indentador.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 33. Ensayo de tensión, bloque sustrato sin recubrimiento.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 34. Microscopio electrónico de barrido, jeol 5900</i>	<i>39</i>
<i>Figura 35. A) estuche de líquidos penetrantes, b) bloque patrón tipo i con liquido penetrante y c) bloque patrón tipo i con revelador.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 36. Bloque patrón tipo ii, a) con liquido penetrante y b) con revelador.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 37. Aplicación del líquido penetrante sobre placas de acero con diferente rugosidad.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 38. Bloque patrón tipo i, a) con líquido fluorescente y b) inspección bajo luz negra.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 39. Bloque patrón tipo ii, a) con líquido fluorescente y b) inspección bajo luz negra.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 40. Resultado de la aplicación del líquido penetrante sobre placas con diferente rugosidad.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 41. Metalografía del sustrato de latón sobre la superficie. Atacada con cloruro férrico y ácido clorhídrico.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 42. Microestructura reportada en la literatura de un latón c26000.[41].....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 43. Recubrimientos de ni de 5 minutos, a) placa 1, b) placa 2, c) placa 6. ...</i>	<i>45</i>
<i>Figura 44. Recubrimientos de ni de 7 minutos, a) placa 3, b) placa 4 y c) placa 5. .</i>	<i>45</i>
<i>Figura 45. Recubrimientos de cromo de 5 minutos, a) placa 1, b) placa 2 y c) placa 6</i>	<i>45</i>
<i>Figura 46. Recubrimientos de cromo 7 minutos, a) placa 3, b) placa 4 y c) placa 5.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 47. Comparativa de espesores de los recubrimientos.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 48. A) imagen señal de electrones secundarios, b) imagen de las diferentes capas identificadas mediante mapeo por eds con medición del espesor de los recubrimientos y c) mapeo de elementos presentes.....</i>	<i>48</i>

<i>Figura 49. Gráfico de la curva esfuerzo deformación del sustrato de latón sin recubrimiento y de los bloques patrón recubiertos de ni-cr (5 y 7 min), señala el 75% del uts.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 50. Probetas fracturas después del ensayo de tensión; a) sustrato sin recubrimiento, b) bloque patrón con recubrimiento ni-cr de 5 min y c) bloque patrón con recubrimiento ni-cr de 7 min.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 51. Recopilación de los datos arrojados por la curva esfuerzo / deformación</i>	<i>50</i>
<i>Figura 52. Bloques patrón tensionados, a) bloque 1 (5 min), b) bloque 2 (5 min), c) bloque 5 (7 min) y d) bloque 4 (7 min).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 53. Bloque patrón 1 (5 min) con líquidos penetrantes nuevos, a) coloreados y, b) fluorescentes.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 54. Bloque patrón 5 (7 min) con líquidos penetrantes antiguos, a) coloreados y, b) fluorescentes.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 55. Bloque patrón 2 (5 min) con líquidos penetrantes antiguos, a) coloreados y, b) fluorescentes.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 56. Bloque patrón 4 (7 min) con líquidos penetrantes nuevos, a) coloreados y, b) fluorescentes.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 57. Metalografía sobre la superficie del sustrato de acero 316L, atacada con ácido oxálico.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 58. Microestructura reportada en la literatura de un acero 316L.[42].....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 59. Recubrimientos de ni de 5 min sobre sustratos de acero, a) placa 1, b) placa 2 y c) placa 3.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 60. Recubrimientos de ni de 7 min sobre sustratos de acero, a) placa 4, b) placa 5 y c) placa 6.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 61. Recubrimientos de cr de 5 min, a) bloque patrón 1, b) bloque patrón 2 y c) bloque patrón 3.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 62. Recubrimientos de cr de 7 min sobre sustratos de acero, a) placa 4, b) placa 5 y c) placa 6.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 63. Gráfico de desviación estándar de los espesores de los recubrimientos.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 64. Gráfica de mediciones de dureza de sustrato sin recubrimiento con carga de 1.961 n.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 65. Gráfica de mediciones de dureza de placa 1 y 5 con desviación estándar</i>	<i>60</i>
<i>Figura 66. Medición de marcas de indentación sobre bloque patrón 2 (5 min) con el software image-pro plus a) carga de 150 kg con indentador de punta de diamante, b)</i>	

<i>carga de 60 kg con punta de diamante y c) carga de 150 kg con indentador de 1/16</i>	61
<i>Figura 67. Medición de marcas de indentación sobre bloque patrón 4 (7 min) con el software image-pro plus a) carga de 100 kg con indentador de 1/16, b) carga de 60 kg con indentador de punta de diamante, c) carga de 100 kg con indentador de punta de diamante, d) carga de 150 kg con indentador de punta de diamante y e) carga de 150 kg con indentador de punta de diamante.</i>	62
<i>Figura 68. Curva esfuerzo deformación del sustrato sin recubrimiento y de los bloques patrón recubiertos de ni-cr (5 y 7 min).</i>	63
<i>Figura 69. Probetas fracturas después del ensayo de tensión; a) sustrato sin recubrimiento, b) bloque patrón con recubrimiento ni-cr de 5 min y c) bloque patrón con recubrimiento ni-cr de 7 min.</i>	63
<i>Figura 70. Recopilación de los datos arrojados por la curva esfuerzo / deformación</i>	64
<i>Figura 71. A) imagen señal de electrones secundarios, b) imagen de electrones en capas eds con medición del espesor de los recubrimientos y c) mapeo de elementos presentes.</i>	65
<i>Figura 72. Bloque patrón 2 (5 min) con líquidos penetrantes a) coloreados, b, c, d y e) fluorescentes.</i>	66
<i>Figura 73. Medición de la huella de indentación con el software image-pro plus.</i>	66
<i>Figura 74. Bloque patrón 4 (7 min) con líquidos penetrantes, a) coloreados, b, c, d, e y f) fluorescentes.</i>	67
<i>Figura 75. Medición de las huellas de indentación con el software image-pro plus.</i>	68
<i>Figura 76. Placas de acero 316L sand-blasting, a) por un minuto, b) dos minutos, c) 3 minutos y, d) 4 minutos.</i>	69
<i>Figura 77. Gráficos de rugosidad vs longitud 0.8X5.</i>	70
<i>(x, y) para diferentes tiempos de sand-blasting a) un minuto, b) dos minutos, c) 3 minutos y d) 4 minutos</i>	70
<i>Figura 78. Limpieza de líquidos penetrantes coloreados sobre placas con sand-blasting, a) por un minuto, b) por dos minutos, c) por 3 minutos y d) por 4 minutos.</i>	71
<i>Figura 79. Limpieza de líquidos penetrantes fluorescentes sobre placas de sand-blasting, a) por un minuto, b) por dos minutos, c) por 3 minutos y d) por 4 minutos.</i>	72
<i>Figura 80. Gráficos de rugosidad vs longitud 0.8X5 para diferentes tiempos de sand-blasting.</i>	74

1. INTRODUCCIÓN

En el análisis de fallas una práctica recurrente es la aplicación de las pruebas no destructivas (PND). Por lo que durante la etapa de mantenimiento y/o inspección de rutina, una de las tres principales pruebas es la técnica de líquidos penetrantes. Es el segundo método más usado para inspeccionar productos en la industria gracias a que tiene un bajo costo, tanto en su implementación como en sus consumibles y puede ser realizada en una gran variedad de materiales.

Como consecuencia, surge la necesidad de evaluar, bajo condiciones específicas y durante la realización de la técnica por medio de bloques patrón comparadores.

Con estos bloques es posible comparar un sistema de inspección con otro, de forma secuencial, al aplicar un sistema y registrar los resultados para hacer la comparación simultánea de dos procesos de inspección de acuerdo al acabado superficial, temperatura entre otras variables que puedan involucrarse en el proceso. Sin embargo, pueden ser usados no solamente para comparar la definición de los patrones de las fallas, sino también para comparar el brillo y legibilidad de las indicaciones de acuerdo con la eficiencia y sensibilidad de los consumibles.

2. JUSTIFICACIÓN

Para evaluar la sensibilidad de los consumibles durante el sistema de inspección es necesario utilizar bloques patrón o de referencia que permitan realizar una evaluación entre materiales, superficies y/o variables en los procesos y poder determinar la efectividad relativa de los consumibles durante la prueba bajo condiciones específicas de inspección.

3. HIPÓTESIS

La evaluación de los líquidos penetrantes (fluorescentes y coloreados) en un bloque patrón (recubrimiento Ni-Cr) están en función del tamaño, grosor y profundidad de las discontinuidades que se generan a partir de las indentaciones, así como en función de las grietas generadas en el ensayo de tensión.

4. OBJETIVOS

- a) Elaborar el bloque patrón comparador de acuerdo a lo consultado con la teoría (materiales, acabado, dimensiones, tipo de bloque patrón etc.) que puedan servir en el laboratorio de análisis de fallas.
- b) Determinar la sensibilidad de los consumibles durante la realización de la técnica de líquidos penetrantes, mediante el uso de los bloques patrón comparadores de "Panel de prueba con superficie de níquel-cromo", obtener resultados confiables y con reproducibilidad.
- c) Evaluar la facilidad de limpieza del penetrante de acuerdo a la rugosidad de la superficie.

5. ANTECEDENTES TEÓRICOS

5.1 Ensayos no destructivos

Las técnicas de ensayos no destructivos (END) permiten detectar, caracterizar y evaluar discontinuidades, analizar estructuras, componentes y piezas sin modificar las condiciones de uso y su aptitud para el servicio. Se puede definir como la técnica de inspección que no provoca daños en el material y que no perjudica e interfiere con el uso futuro de las piezas que son inspeccionadas. A partir de esta definición podemos afirmar que existen ensayos que son destructivos tales como: tracción y compresión los cuales nos permiten obtener características mecánicas del material.

De la misma forma hay determinadas aplicaciones de ensayos netamente no destructivos, donde la inapropiada aplicación de la técnica puede traducirse en el daño de la pieza. Los END se utilizan en cualquier momento de la vida útil de la pieza, es decir los podemos emplear durante el proceso de fabricación, como ensayo de inspección o como ensayo de servicio y mantenimiento. Al hacer una comparación podemos afirmar que los END aplicados a un control de calidad estadístico, permiten sin duda comprobar, con un cierto grado de seguridad el nivel de calidad de una producción. Sin embargo, requieren de un determinado número de muestras, obteniéndose datos de una zona local pero no de todo el volumen, tampoco pueden asegurar la calidad de todos los elementos del lote.[1]

Los END persiguen un objetivo:

- Asegurar calidad y confiabilidad
- Producir beneficios económicos
- Prevenir accidentes
- Contribuir al desarrollo y el conocimiento de los materiales

5.2 Líquidos penetrantes

El ensayo por líquidos penetrantes es un método de ensayo no destructivo que permite la determinación de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. El procedimiento está limitado a discontinuidades que se encuentren abiertas a la superficie, si por el contrario el defecto es subsuperficial no se puede detectar al usar esta técnica.

El procedimiento se basa en la aplicación de un líquido coloreado aplicado sobre la superficie limpia de la pieza que penetra en las discontinuidades, al limpiar el exceso de líquido de la superficie este queda solamente introducido en las discontinuidades. Al aplicar posteriormente un agente denominado revelador, ese líquido debido al fenómeno de capilaridad, señala sobre la superficie las zonas en las que existen discontinuidades.[2]

5.2.1 Principio del método

Los líquidos penetrantes poseen la propiedad de filtrarse a través de las discontinuidades que presentan los materiales basándose en la acción capilar, que es la capacidad que poseen los líquidos de ascender y descender por dos paredes cercanas entre sí. También se basa en el principio físico de cohesión, viscosidad, adhesión y tensión superficial.

Características de los líquidos penetrantes:

1. Alta penetración en discontinuidades muy finas
2. Relativamente fácil de remover de la superficie, pero no de la grieta.
3. Permanecer en estado líquido y tener alta afinidad por el revelador.
4. Formador de películas muy finas

5. De color y/o fluorescencia estable y visible aún en pequeñas concentraciones.
6. No debe reaccionar con el material que está bajo inspección.
7. Inodoro, atóxico y con alto grado de inflamación.
8. Estable ante condiciones de almacenamiento.
9. Son Higroscópicos (los pigmentos que lo constituyen poseen afinidad con el agua).

5.2.2 Propiedades físicas de los penetrantes

❖ Viscosidad:

Es la propiedad que presentan los líquidos de oponerse al flujo, función de la temperatura y de la composición de los constituyentes del líquido. Esta propiedad no afecta a la habilidad que posee el líquido de introducirse en las discontinuidades, pero sí afecta a la velocidad de penetración. Si un líquido es demasiado viscoso requiere de largos períodos para emigrar dentro de una discontinuidad, mientras que aquellos que son poco viscosos se escurren rápidamente.

❖ Humectabilidad:

Es una propiedad física que afecta las características de penetración y de la mojabilidad de los líquidos penetrantes, controlada por el ángulo de contacto y la tensión superficial. En el momento en que un líquido hace contacto con la superficie de un sólido, la fuerza de cohesión (propia entre las moléculas del líquido) actúa con la fuerza de adhesión (entre las moléculas del líquido y la superficie del sólido).

❖ Tensión Superficial:

La fuerza de cohesión entre las moléculas de un líquido es la causa de la tensión superficial, propiedad que permite que un líquido humedezca la superficie de un sólido. En general los líquidos con baja tensión superficial presentan buenas propiedades de penetración.

❖ Capilaridad:

La capilaridad junto con la humectabilidad, determina el poder de penetración de un líquido a través de las discontinuidades. En física, el menisco es la curvatura de la superficie de un líquido que se produce en respuesta a la superficie del recipiente que lo contiene. Esta curvatura puede ser cóncava o convexa, según si las moléculas del líquido y las del recipiente se atraen o repelen. La concavidad del menisco se origina

en el momento en que las fuerzas de adhesión entre las moléculas de un líquido y las paredes del recipiente que lo contiene son mayores que las fuerzas de cohesión del líquido. La convexidad del menisco se origina cuando las fuerzas de cohesión son mayores que las de adhesión. La forma del menisco está relacionada con la altura del líquido en un capilar. La tensión superficial actúa al succionar el líquido cuando el menisco es cóncavo, y se rechaza cuando es convexo.[1]

5.2.3 Técnica de inspección

La realización del ensayo requiere efectuar secuencialmente las siguientes operaciones según la norma ASTM E165 [3]:

1. Preparación y limpieza previa de la superficie a ensayar.
2. Aplicación del líquido penetrante, tiempo de penetración de acuerdo a las condiciones del sistema.
3. Eliminación del exceso de penetrante de la superficie de ensayo.
4. Aplicación del revelador.
5. Inspección para interpretación y evaluación de las indicaciones.
6. Limpieza final

5.2.3.1 Preparación y limpieza previa

Antes de aplicar el líquido penetrante se debe eliminar de la superficie cualquier elemento contaminante que pudiera dificultar, o incluso interferir, tanto en la penetración del líquido penetrante como en las indicaciones. La presencia en la superficie de la pieza de agua, aceites, restos de ácidos o alcalinos, restos de recubrimientos como pinturas o barnices, óxidos u otras suciedades que se adhieren a la superficie, podría impedir la humectación y penetración al tapar la apertura a la superficie de las discontinuidades, o podría incluso reaccionar químicamente con el penetrante, o absorberlo para producir indicaciones falsas. La elección de la técnica de limpieza adecuada dependerá del tipo de contaminante a eliminar. Las técnicas de limpieza recomendadas son:

- 1) Limpieza con detergentes
- 2) Limpieza con disolvente
- 3) Limpieza con limpiadores alcalinos
- 4) Limpieza con vapor desengrasante
- 5) Limpieza por ultrasonido
- 6) Limpieza con decapantes
- 7) Limpieza por medios mecánicos (sin dañar la geometría de la pieza)
- 8) Ataque ácido

5.2.3.2 Aplicación del líquido penetrante

Existen distintas maneras de aplicar la prueba de líquido penetrante:

1. Por inmersión de la pieza
2. Untar el líquido con una brocha o cepillo
3. Verter el líquido directamente sobre la pieza
4. Por pulverización

El objetivo es que se cubra en su totalidad la pieza para obtener una película fina y uniforme en toda la superficie. Al obtener esta película se deberá esperar un lapso conocido como “tiempo de penetración”, durante el cual el líquido entrará en las discontinuidades.

Generalmente el tiempo de penetración va de 5 a 15 minutos. Esto depende del material que se inspeccione y la clase de grietas que presente.

Tipos de líquidos penetrantes:

El líquido penetrante debe tener necesariamente un color de contraste y en función de la fuente de luz que se precisa para observación de las indicaciones que proporciona el ensayo, se clasifican en:

- ❖ Líquidos penetrantes coloreados, contienen pigmentos que los hacen visibles con luz natural o artificial blanca. El color más utilizado es el rojo.

- ❖ Líquidos penetrantes fluorescentes, necesitan para su observación una iluminación especial llamada luz negra o ultravioleta, y lentes especiales para una mayor facilidad de identificación.
- ❖ Líquidos penetrantes mixtos (fluorescentes- coloreados) mezcla de los dos anteriores.

5.2.3.3 Eliminación del exceso de penetrante

En esta fase procederemos a retirar la capa superficial del líquido penetrante. De modo que únicamente quede el almacenado en las discontinuidades.

Este es el paso más importante del proceso, ya que de su correcta realización dependerá el resultado de la inspección. De no eliminar correctamente el líquido penetrante de donde no hay grietas, en los resultados aparecerán defectos falsos o enmascaramiento de grietas.

Para retirar correctamente el líquido penetrante se aconseja utilizar trapo o papel absorbente impregnado en disolventes.[4]

5.2.3.4 Aplicación del revelador

El revelado es la operación que hace visible el defecto al ojo humano. Actúa como un papel secante que extrae el líquido de la discontinuidad o defecto superficial y contribuye a aumentar la visibilidad de las indicaciones por ser de un color opuesto al penetrante y proporcionar un fondo sobre el que contrasta el color del penetrante (generalmente blanco). Los reveladores pueden ser:

- Reveladores de polvo seco. Como primeros reveladores se usaron yeso o talco en forma de polvo muy fino que aún hoy se utilizan, aunque existen otros productos que proporcionan mejores resultados.
- Reveladores acuosos, partículas de polvo seco para preparar en suspensión acuosa.
- Reveladores no acuosos, polvo revelador en suspensión en un disolvente orgánico volátil, envasado en botes de aerosol que se aplica por pulverización.

Una vez que se aplica, se deberá esperar entre 5 y 15 minutos.

5.2.3.5 Inspección para interpretación y evaluación

En la fase de inspección para la observación de las indicaciones, que son los resultados que se obtienen del ensayo, sólo se requiere una buena iluminación si se usaron penetrantes que son visibles a la luz natural o blanca, con penetrantes fluorescentes sensibles a la luz ultravioleta se requerirá un equipo de luz negra y una cámara oscura.

5.2.3.6 Limpieza final

Tras la inspección se realizará una limpieza final de la pieza para volver a su estado original. Se utilizarán, en general, los mismos sistemas de limpieza establecidos en (5.2.3.1) [2].

5.3 Sustrato

Sustrato es un término utilizado en la ciencia y la ingeniería de materiales para describir el material base sobre el que se realiza el proceso. Esta superficie podría usarse para producir nuevas películas o capas de material, como recubrimientos depositados. Podría ser la base a la que se adhiera pintura, adhesivos o cinta adhesiva [5]. Técnicamente, el sustrato comprende todas las propiedades del material: tanto internas (p.ej., la flexibilidad y la amortiguación de vibraciones) como superficiales (p.ej., la resistencia a la abrasión y la textura). [6]

5.4 Bloques patrón

Los bloques patrón son dispositivos de forma rectangular sólida, y tienen la capacidad de materializar una longitud determinada con una altísima exactitud, ya que estas piezas presentan un pulido que garantiza un excelente paralelismo y planitud.

Los bloques patrón permiten conocer el error de los instrumentos de medición, como resultado de la calibración de los mismos.[7]

5.4.1 Bloque patrón tipo I: con superficie de níquel-cromo agrietado

El bloque de prueba de referencia consta de dos paneles rectangulares recubiertos de níquel-cromo con ranuras transversales y un revestimiento de Ni-Cr (*figura 1*). El grosor del recubrimiento, y por lo tanto también la profundidad de las ranuras, variará entre 10 y 50 μm , lo cual depende de la aplicación [8]. Los paneles de prueba de Ni-Cr brindan información sobre la sensibilidad y el rendimiento continuos del sistema de procesamiento de penetrantes al comparar los penetrantes en uso con productos nuevos sin usar para determinar si el penetrante funciona correctamente.[9]

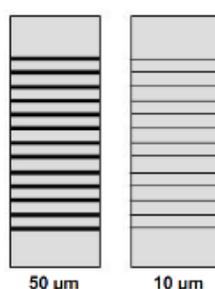


Figura 1. Bloque patrón tipo I agrietado.

5.4.1.1 Latón

Latón es el término genérico para una variedad de aleaciones de cobre y zinc, se puede alea con zinc en diferentes proporciones, lo que da como resultado un material de diferentes propiedades mecánicas, anticorrosivas y térmicas. Cantidades mayores de zinc proporcionan al material una resistencia y ductilidad mejoradas.

Los latones con un contenido de cobre superior al 63% son los más dúctiles de cualquier aleación de cobre, el punto de fusión es relativamente bajo y su fluidez lo convierten en un material relativamente fácil de fundir. El color puede variar de rojo a amarillo a dorado a plateado, el color depende del contenido de zinc. Algunos de los usos comunes de las aleaciones de latón incluyen bisutería, cerraduras, bisagras, engranajes, cojinetes, acoplamientos de mangueras, carcasas de municiones, radiadores de automóviles, instrumentos musicales, envases electrónicos, monedas, etc.[10]

5.4.2 Bloque patrón tipo II: bloque comparador con indentaciones superficiales

El panel de prueba tipo II se produce con una lámina de acero inoxidable recubierta de níquel-cromo. En la mitad de la parte trasera se crean cinco muescas mediante el uso de diferentes cargas y un indentador hemisférico. Esto conduce a áreas de grietas artificiales con varias dimensiones en el lado opuesto. En la otra mitad del frente del panel de prueba hay 4 áreas con diferentes rugosidades que se utilizan para comprobar la capacidad de enjuague de los penetrantes (*figura 2*).[11]



Figura 2. Bloque patrón tipo II.

5.4.2.1 Acero inoxidable

El acero inoxidable es una aleación de acero con al menos un 10,5% de cromo con o sin otros elementos de aleación y un máximo de 1,2% de carbono en masa (norma europea EN 10088-1). Los aceros inoxidables, conocidos por su resistencia a la corrosión, que aumenta al aumentar el contenido de cromo. La resistencia a la corrosión también se puede mejorar mediante la adición de níquel y molibdeno. La resistencia de estas aleaciones metálicas a los efectos químicos de los agentes corrosivos se basa en la pasivación.[12]

5.5 Recubrimiento de Níquel o Niquelado

Como paso previo a iniciar el proceso de cromado, las piezas deben ser sometidas a un baño de níquel que les confieren una mayor protección frente a agentes externos. El niquelado es un proceso electrolítico para formar un revestimiento metálico de níquel (Ni) sobre una superficie, sin importar el grosor del revestimiento, ni el metal base en el cual se realiza la electrodeposición, ofrece un acabado altamente resistente a la corrosión y muy estético.

- Niquelado mate. Se realiza para dar capas gruesas de níquel sobre hierro, cobre, latón y otros metales (excepto aluminio), es un baño muy concentrado que permite trabajar con corrientes de 8 – 20 amperios por decímetro cuadrado.
- Niquelado brillante. Al baño electrolítico se le adiciona un abrillantador para obtener un acabado espejo. Se trabaja a una temperatura entre 40 – 50 °C, puede trabajarse a temperatura ambiente.[13]

En los recubrimientos con níquel se puede utilizar baño de sulfamato o baño Watts con sulfato de níquel, el baño con sulfamato generalmente está compuesto de sulfamato de níquel, ácido bórico, bromuro de níquel, ánodos de níquel y aditivos que influyen sobre las propiedades. En un baño Watts de níquel modificado, las sales utilizadas con más frecuencia son el sulfato de níquel ($NiSO_4$) como la principal fuente de iones y el cloruro de níquel por su efecto despasivizante de los iones de cloro sobre los ánodos de níquel. La composición estándar y las condiciones del baño para el niquelado en un baño Watts con sulfato de níquel se presentan en la *Tabla 1*. [14]

Tabla 1. Composición y condiciones del baño de watts con sulfato de níquel.

Composición	Baño (g/L)
Sulfato de níquel	300
Cloruro de níquel	50
Ácido bórico	35
Condiciones:	
Temperatura (°C)	40-70
Densidad de corriente (A/dm ²)	2-10
Agitación catódica	recomendada
pH	3.5-4.5
Ánodos	níquel
Filtración	continua
Eficiencia del cátodo (%)	-----
Relación de área de ánodo al cátodo	1:1
Voltaje (voltios)	-----

Las variables a controlar en un baño de níquel son: temperatura, pH, agitación.

Generalmente al incrementar la temperatura, dentro del rango de trabajo, permite incrementar la densidad de corriente de operación, con menor voltaje entre electrodos. Esto resulta en una menor dureza del depósito y una mayor ductilidad. La baja del pH, también permite incrementar la densidad de corriente, pero baja la eficiencia catódica.

En el momento que el pH de una solución de níquel sube (6-6.5), el hidróxido de níquel aparece en la disolución, la solución no solo se empobrece en níquel y se enturbia, sino que, con el incremento del pH se depositan compuestos básicos de níquel en proporción cada vez mayor, cuanto más abundante sea el contenido de base u óxido más duro será el depósito obtenido, es decir que un pH elevado en el baño de níquel reduce los abrillantadores, elimina en parte el brillo, aumenta la dureza del depósito y permite posteriormente resquebradura del níquel, en lo contrario un pH demasiado bajo (2-2.5) e incluso más bajo permite una mayor producción de hidrógeno y produce picaduras, estas picaduras aparte de reducir el brillo da una apariencia de material picado o completamente poroso.

Por eso es muy importante un pH entre un rango de (3.6 a 4.8) que es el rango óptimo de trabajo, el pH se puede mantener, si es demasiado bajo, se le puede incrementar con adiciones de sosa cáustica o si es demasiada elevada, con ácido nítrico, con ácido bórico, o con ácido sulfúrico diluido.[15]

En el recubrimiento con Ni, la distribución es dependiente de factores geométricos de la pieza, de cómo se sitúa con respecto a los ánodos y de las dimensiones del sistema de electrodeposición.[16]

5.6 Cromado o recubrimiento de Cromo

El cromado es un recubrimiento para proteger de la corrosión atmosférica y mejorar la apariencia de piezas metálicas y plásticos, también se utiliza para restaurar y prolongar la vida de superficies. En la industria, este proceso se divide en dos líneas: el cromo decorativo y el cromo duro, este último es el empleado para protección de piezas industriales.[17]

En el cromado brillante se depositan capas de cromo delgadas y brillantes de efecto decorativo o como protección anticorrosiva, sobre capas intermedias de níquel.

El cromado duro se utiliza principalmente para aumentar la dureza de herramientas, así como para incrementar la resistencia al desgaste de moldes, válvulas, etc. al depositar 14 capas de cromo de mayor espesor a temperaturas elevadas. La composición y condiciones de los baños de cromo se presentan en la *Tabla 2*. Durante el proceso de cromado ocurre un sobrepotencial en la capa superficial de la pieza a cromar, a causa de reacciones de óxido-reducción y diferencias de concentración, lo que genera una separación simultánea de hidrógeno que el baño emite como gas y que arrastra fracciones del baño.[14]

Tabla 2. Composición y condiciones de baño de cromo.

Composición:	Baño N°1 (g/L)	Baño N°2 (g/L)	Baño N°3 (g/L)
Ácido crómico	247.5	397.5	337.5
Ácido sulfúrico	2.47	3.97	2.17
Relación de baño	100:1	101:1	155:1
Cromo trivalente	---	---	0.525 min
Condiciones:			
Temperatura (°C)	43-49	43-49	54
Densidad de corriente (A/dm ²)	4-10	4-10	4-10
Agitación catódica	Opcional	Opcional	Opcional
Ánodos	Plomo	Plomo	Plomo
Eficiencias Catódicas (%)	13	13	13
Filtración	No común	No común	No común
Relación de área de ánodo al cátodo	1:1-2:1	1:1-2:1	1:1-2:1
Voltaje (voltios)	6-12	6-12	6-12

Variación de los baños durante el funcionamiento. Para un buen funcionamiento de los baños de cromo se debe poseer una relación de superficie anódica a la catódica de aproximadamente 3 a 1 si la relación de ánodo al cátodo es demasiado baja, hay la tendencia a formarse cromo trivalente, el cual, produce depósitos con baja penetración y baja dureza, incluso manchas, todo esto se puede controlar por medio

de la celda de Hull o por análisis cuantitativos, el cual, va a dar un nivel aproximado de los componentes del baño y se puede controlar fácilmente.

El principal tipo de composición para el baño de cromo es: ácido crómico o trióxido de cromo con ácido sulfúrico. Aunque existen formulaciones que pueden variar principalmente en los aditivos que se usan en vez del ácido sulfúrico y de los sulfatos en las cuales se le adiciona fluoruros o sulfuros los cuales producen una gran dureza y elevado brillo, además de aumentar la penetración en los baños. Una formulación típica para el cromado decorativo a temperatura ambiente es la de J. Hyner, la cual puede ser aplicada sobre diferentes metales de base, este baño consta fundamentalmente de anhídrido crómico, fluorosilicato de sodio y sulfato de sodio. El tiempo de electrodeposición es de 6 a 10 minutos. Para el cromado decorativo, es suficiente aplicar un espesor de 0,25 μm . [15]

Al igual que en el resto de recubrimientos por electrólisis, el cromado se efectúa a partir de los siguientes elementos:

- Una solución líquida a alta temperatura (electrolito), en este caso compuesta principalmente por ácido crómico, una pequeña cantidad de ácido sulfúrico y otros catalizadores específicos.
- El ánodo o electrodo positivo: un elemento de plomo conectado al terminal positivo del generador de corriente eléctrica.

Los cátodos o electrodo negativo: las piezas que se van a cromar, colocadas en un bastidor conectado al terminal negativo del generador. Tanto el electrodo positivo (la placa de plomo) como los negativos (los objetos a cromar) están sumergidos en el electrolito, se forma un circuito eléctrico cerrado de corriente continua.

En el momento en que el generador empieza a funcionar, se inicia una reacción de oxidación en el ánodo de plomo, constituyéndose una capa de óxido que conduce la corriente eléctrica hacia el electrolito.

Desde ahí, la corriente se desplaza hasta las piezas a cromar, lo cual arrastra consigo los iones de cromo que contiene la solución líquida, los cuales acaban depositados en forma de cromo metálico sobre la superficie de los objetos.

A diferencia de lo que ocurre en otros recubrimientos electrolíticos, como los baños de níquel o de cobre, el cromo que se deposita en las piezas no procede del ánodo, sino del ácido crómico que forma parte del electrolito. De este modo, conforme pasan los minutos y el cromo se deposita sobre los objetos, la concentración del metal en la disolución disminuye. Para evitarlo, se deben añadir nuevas cantidades de ácido crómico.[18]

Los espesores de recubrimientos de níquel más cromo, sobre los diversos metales y sus aleaciones cubiertos por la norma INEN 954, se establecen en la *tabla 3* y *4* indica, además, la abreviatura correspondiente a cada tipo de recubrimiento y el índice de servicio aplicables a cada espesor de recubrimiento. Los datos entre paréntesis deben evitarse.

Tabla 3. Espesores de recubrimientos de níquel-cromo sobre Cu (μm).[19]

1	2	3
Recubrimiento-abreviatura	Espesor mínimo Ni (μm)	Índice de servicio
Sobre cobre y aleaciones de cobre		
(Cu/el Ni 3 b Cr 0.3 r) Cu/el Ni 5 b Cr 0.3 r	-3 5	1
(Cu/el Ni 8 b Cr 0.3 r) (Cu/el Ni 10 b Cr 0.3 r) (Cu/el Ni 12 b Cr 0.3 r)	-8 10 -12	2
Cu/el Ni 20 b Cr 0.3	20	3
Cu/el Ni 25 d Cr 0.3 mp Cu/el Ni 25 d Cr 0.3 mc Cu/el Ni 30 d Cr 0.8 f Cu/el Ni 30 d Cr 0.8 r Cu/el Ni 25 p Cr 0.3 mp Cu/el Ni 25 p Cr 0.3 mc Cu/el Ni 30 p Cr 0.3 r Cu/el Ni 25 b Cr 0.3 mp Cu/el Ni 25 b Cr 0.3 mc	25 25 30 30 25 25 30 25 25	4

Tabla 4. Espesores de recubrimientos de níquel-cromo en Fe (μm).[19]

1	2	3
Recubrimiento-abreviatura	Espesor mínimo Ni (μm)	Índice de servicio
Sobre acero o fundición		
Fe/el Ni 10 b Cr 0.3 r (Fe/el Ni 12 b Cr 0.3 r)	10 -12	1
Fe/el Ni 12 v Cr 0.3 r	20	2
Fe/el Ni 25 d Cr 0.3 mp Fe/el Ni 25 d Cr 0.3 mc Fe/el Ni 30 d Cr 0.8 f Fe/el Ni 30 d Cr 0.3 r Fe/el Ni 25 p Cr 0.3 mp Fe/el Ni 25 p Cr 0.3 mp Fe/el Ni 30 p Cr 0.3 r Fe/el Ni 30 d Cr 0.3 mp Fe/el Ni 30 1 Cr 0.3 mc Fe/el Ni 40 b Cr 0.3 (Fe/el Ni 12 b Cr 0.3 r) Fe/el Ni 50 d Cr 0.3 mp Fe/el Ni 30 d Cr 0.3 mc Fe/el Ni 40 d Cr 0.8 f Fe/el Ni 40 d Cr 0.3 r	25 25 30 30 25 25 30 30 30 30 40 -50 30 30 40 40	3
Fe/el Ni 30 p Cr 0.3 mp Fe/el Ni 30 p Cr 0.3 mc Fe/el Ni 40 p Cr 0.3 r Fe/el Ni 40 b Cr 0.3 mp Fe/el Ni 40 b Cr 0.3 mc (Fe/el Ni 50 p Cr 0.3 mc)	30 30 40 40 40 -50	4

Es sumamente importante que una vez que una pieza está níquelada, se lave en agua normal, debe cromarse casi inmediatamente, no puede dejarse esa pieza en el agua por más de una hora, ya que el níquel, produce una pequeña oxidación en el material y posteriormente el cromo no tiene la suficiente adherencia y se puede descascarar y pelar, para activar estos depósitos de níquel y realizar el baño de cromo se puede utilizar una solución de ácido clorhídrico al 10% previo al cromado o sulfato de cobre.[15]

5.7 Preparación superficial

El objetivo de la preparación y limpieza de la superficie es eliminar impurezas como la grasa y el óxido de la superficie de la pieza con la finalidad de asegurar una buena

adherencia del recubrimiento. Para la preparación y limpieza de las superficies, se aplican procedimientos como el pretratamiento mecánico de las superficies (pulido) y los métodos químicos de pretratamiento de superficies: el desengrasado mediante limpiadores alcalinos, hidrocarburos clorados o por vía electrolítica, así como el decapado. Antes de que una pieza se incorpore al proceso de pulido, desengrasado y recubrimiento, debe realizarse una inspección previa para asegurar que la pieza no presente defectos inaceptables que no se puedan corregir durante el recubrimiento. Estos defectos pueden ser rebabas, bordes, concavidades, moho y otras imperfecciones en la pieza.

5.7.1 Pulido

Esta etapa tiene la finalidad de eliminar asperezas o deformaciones, con el uso de lijas y pastas abrasivas.

5.7.2 Desengrase

El desengrase puede efectuarse básicamente de dos formas: con solventes orgánicos y con limpiadores en base acuosa alcalina o ácida. Entre los solventes orgánicos más utilizados se encuentran el tetracloruro de carbono y el tricloroetileno, los limpiadores en base acuosa comprenden una gran variedad de métodos que utilizan sales alcalinas, detergentes, medios dispersantes y ablandadores de agua.

5.7.3 Decapado

Consiste en eliminar las capas de óxido formado en la superficie de las piezas metálicas debido al contacto entre éstas y la atmósfera. El decapado se realiza al sumergir la pieza en una solución que puede ser ácida o alcalina depende del tipo de proceso. El decapado con ácido se utiliza para eliminar impurezas y óxidos a través de un ataque químico, el cual frecuentemente se aplica después de un lavado alcalino. Se utilizan diferentes ácidos, solos o mezclados, como el ácido nítrico, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y ácido fosfórico.[14]

5.7.4 Sand-blasting

Este sistema consiste en la limpieza de una superficie por la acción de un abrasivo granulado expulsado por aire comprimido a través de una boquilla, conocido como limpieza por chorro de arena, aun cuando el abrasivo no siempre es arena. La limpieza con sand-blast es ampliamente usada para remover óxido, escama de laminación y cualquier tipo de recubrimiento de las superficies preparándolas para la aplicación de un recubrimiento.

El equipo consiste de una cámara en la que la arena y el aire se mezclan. La mezcla se desplaza a través de una boquilla de mano para dirigir las partículas hacia la superficie o la pieza. Los inyectores vienen en una variedad de formas, tamaños y materiales. El carburo de boro es un material para inyectores, ya que resiste bien el desgaste abrasivo. El sand-blasting es aquel que remueve toda la corrosión, inclusive aquella de los cráteres más profundos sin desgastar de manera importante el material. Además, proporciona a la superficie un acabado marcado que sirve de anclaje para volver a recubrir.

Dentro de los abrasivos más frecuentemente empleados en el Sand-blast: se encuentran: arena sílica, perla de vidrio, óxido de aluminio, abrasivo de plástico, carburo de silicio granalla de acero, bicarbonato de sodio, olote de maíz, granate, cáscara de nuez, escoria de cobre.[20]

5.8 Rugosidad

La rugosidad o textura primaria, está formada por surcos o marcas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado (herramienta, partículas abrasivas, acción química, etc.) y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación. Los espacios entre crestas varían entre 4 y 50 veces la profundidad de la depresión. [21]

La rugosidad incluye las irregularidades de corto alcance en el espacio y la textura superficial inherente al proceso de fabricación. La rugosidad está creada por valles y

picos de amplitud variable y espaciado superior a las dimensiones moleculares. La ondulación superficial consiste en irregularidades de la superficie de espaciado superior a la rugosidad; mientras que el error de forma es una desviación grande de la forma nominal de la pieza.[22]

La rugosidad evalúa las pequeñas desviaciones verticales de la superficie nominal que vienen normalmente determinadas por las características del material, el proceso de transformado de la pieza o las aportadas por el propio recubrimiento. Para esta medida se utiliza un rugosímetro que proporciona la profundidad media de los valores absolutos de las desviaciones.[23]

5.8.1 Perfil de rugosidad

El rugosímetro es un dispositivo de medición de la rugosidad de la superficie, el proceso consiste en recorrer la superficie con una aguja palpadora que se mueve verticalmente y horizontalmente (x , y , z). El movimiento de la aguja es transferido en impulsos eléctricos, que luego se registran en el gráfico. La muestra que recoge el palpador varía ente 0.08 y 25.0 mm. La aguja principalmente es de diamante o carburo de tungsteno. El instrumento registra las distancias hacia arriba y hacia abajo que recorre el palpador de rugosidad a medida que atraviesa la superficie. La unidad de medida del rugosímetro son las micras expresadas en los siguientes parámetros:

- ❖ Rugosidad total (R_t) de acuerdo con ISO 428710, donde R_t es la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más bajo dentro de cualquier longitud de evaluación dada de 0.5 pulgadas. Se hacen cinco de estas trazas y se promedian los valores de R_t para obtener de nuevo la media de los picos máximos[24].
- ❖ Rugosidad aritmética (R_a): el aparato en este caso contabiliza todas las rugosidades que ha tomado y lo que hace es sacar el promedio de éstas y reflejarlo como R_a .
- ❖ Rugosidad mediana (R_z): Permite establecer cuál es la longitud que existe entre la rugosidad de mayor tamaño y la rugosidad de menor tamaño.

- ❖ Rugosidad cuadrada (R_q): Calcula una raíz cuadrada de todas las rugosidades que se han conseguido a lo largo de la superficie.[25]

5.9 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión provee información sobre la resistencia y ductilidad de los materiales mediante tensiones de tracción uniaxiales. La muestra normalmente llamada *probeta*, se somete a una tensión, consistente en aplicar dos fuerzas opuestas en los extremos que estiran la barra y la deforman. El ensayo prosigue al ejercer esfuerzos cada vez mayores, hasta que la probeta finalmente se rompe. Se toma nota de la magnitud de las fuerzas y de la deformación que producen en la probeta, desde fuerzas pequeñas que no causan deformación permanente, hasta la tensión que causa la rotura de la pieza.[26]

Esta información será útil para comparar materiales entre sí, desarrollar nuevos materiales, mantener un control de calidad y para diseñar bajo ciertas circunstancias.

Un ensayo de tensión emite 4 principales datos mecánicos:

- **Cedencia (Límite Elástico, σ_{ys}):** es el esfuerzo máximo que permite el material antes de sufrir deformaciones permanentes.
- **Fuerza de Tensión (UTS por sus siglas en inglés):** es el esfuerzo máximo que permite un material antes de iniciar la rotura.
- **Elongación:** es el porcentaje de alargamiento longitudinal total de la muestra mecanizada.
- **Reducción de área:** es el porcentaje de reducción transversal de la muestra mecanizada.

Si se grafica cada cierto tiempo el esfuerzo aplicado contra la deformación unitaria de la muestra, se obtiene una curva de esfuerzo-deformación (*Figura 3*).[27]

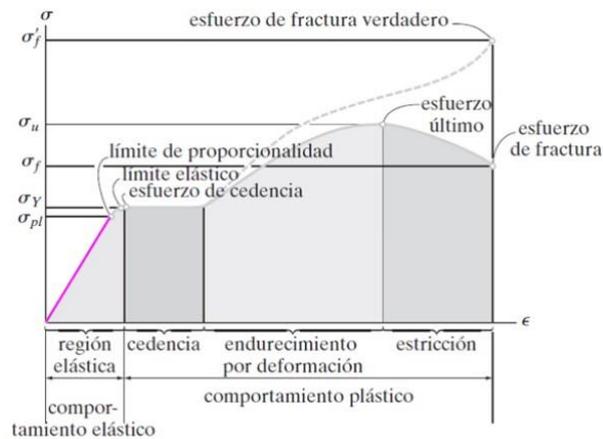


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación.[26]

En la curva se distinguen dos regiones importantes: zona elástica y zona plástica, que se describen a continuación

5.9.1 Zona elástica

Cuando el esfuerzo de tensión (σ) es pequeño, la deformación es proporcional; una vez que el esfuerzo cesa, la muestra a la que se le aplica dicho esfuerzo regresa a sus dimensiones originales. Esta es la región elástica marcada en la *figura 3* en color rosa, que se extiende hasta el punto llamado límite de proporcionalidad.

Desde el límite de proporcionalidad y al aumentar el esfuerzo aplicado se avanza en una región donde la deformación es reversible; finaliza en el punto a partir del cual el cuerpo queda deformado permanentemente, llamado límite elástico.

5.9.2 Zona plástica

Seguidamente el material entra en la región de comportamiento plástico. Sobrepasada la zona de comportamiento elástico, el material entra en la región del esfuerzo de cedencia o fluencia, en la cual la probeta se deforma, pero no se rompe, si bien el esfuerzo se mantiene constante en σ_y . Superada la zona de cedencia la deformación aumenta con el esfuerzo aplicado, pero ya no de manera lineal. El material experimenta cambios a nivel atómico y se produce un endurecimiento por deformación. Por ello es que se necesitan esfuerzos cada vez mayores para lograr una deformación.

El límite de la zona de inestabilidad plástica está en el último esfuerzo. El material se considera roto en este punto, aunque aún la probeta sigue sin presentar fractura de manera macroscópica. A partir de allí la carga necesaria para producir deformación se reduce y la probeta se adelgaza progresivamente (estricción) hasta que por fin se fractura.

5.10 Tratamiento térmico

Se definen como los procesos para modificar la resistencia, ductilidad, dureza y algunas otras propiedades de los metales, a estos procesos que involucran la temperatura, es decir, es la operación de calentamiento o enfriamiento de un metal en su estado sólido a temperaturas y condiciones determinadas para mejorar sus propiedades mecánicas. Producir estos cambios se debe gracias a la generación de ciertas condiciones en el calentamiento, tiempo de permanencia o enfriamiento de los materiales tratados. El objetivo de todos los tratamientos térmicos es lograr que los cambios microestructurales se produzcan en las condiciones deseadas. Para realizar un tratamiento térmico se deben conocer las propiedades del metal en sus diversos estados estructurales.

5.10.1 Normalizado

Como su nombre lo dice, es el tratamiento que se le da a los aceros para darle las características necesarias para considerarlos “normales”. Es utilizado para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas y sirve para afinar su estructura, mejorar la maquinabilidad y eliminar tensiones que se forman al momento de solidificación. Un tipo de tratamiento como este se lleva a cabo a una determinada temperatura depende de austenización y del tamaño de la muestra, seguida de un enfriamiento con aire quieto hasta llegar a una temperatura ambiente. El objetivo de este tipo de tratamiento es aumentar la dureza del acero con el que se trabaje.[28]

5.11 Dureza

La dureza, desde el punto de vista metalúrgico, es la resistencia que presenta un material a la deformación plástica causada por la penetración de un indentador bajo la acción de una carga, es decir, la facilidad o dificultad en que se genere una huella permanente en la superficie del material. Es por ello que la determinación de dureza metalúrgica implica la medición de la huella que deja un indentador sobre la superficie del material a ensayar al aplicarle una carga dada, ya sea midiendo la profundidad o la superficie de la de la huella formada.[29]

5.11.1 Microdureza Vickers

El método de ensayo de dureza Vickers (HV por sus siglas en inglés) es adecuado para el ensayo de todo tipo de metales y, por ello, es el que tiene el campo de aplicación más amplio.

En el ensayo de dureza Vickers, el indentador se compone de una pirámide de diamante, con superficie de base cuadrada y cuya forma un ángulo de $\alpha = 136^\circ$ (figura 4), y ejerce una fuerza de ensayo determinada sobre la probeta (según norma ISO 6507 / ASTM E384, a partir de 10 g) y se mantiene de acuerdo con el tiempo de permanencia definido.

Las longitudes de ambas diagonales de la huella residual se miden de forma óptica. La dureza Vickers se calcula a partir de la media de las diagonales y la fuerza de ensayo aplicada.[30]

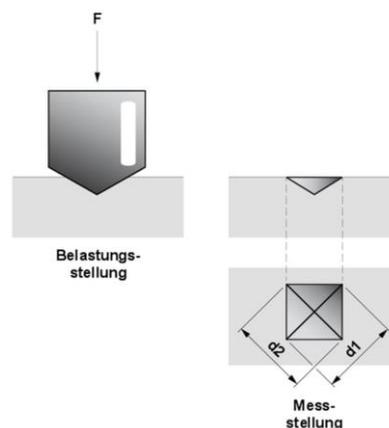


Figura 4. Punta de durómetro para ensayo de microdureza Vickers.

5.12 Espectroscopía de emisión óptica

Un espectrómetro de emisión óptica (OES por sus siglas en inglés) se utiliza para realizar ensayos cualitativos o cuantitativos de una muestra de sustancia. En pocas palabras, le dice al técnico los componentes químicos reales que se encuentran dentro de una muestra de prueba y también sobre la concentración de todos y cada uno de los componentes. Otro nombre común para este método analítico es Espectrometría de emisión de chispa.

Se utiliza una chispa o arco eléctrico para excitar los átomos contenidos dentro de una muestra metálica. Una vez que se aplica el arco eléctrico a un voltaje alto, los átomos de metal se excitan primero, seguido de la desexcitación de los átomos durante la cual emiten fotones de longitudes de onda definidas. Las longitudes de onda así emitidas, se separan mediante un análisis óptico a través de una rejilla de difracción. Dado que cada longitud de onda corresponde a un elemento específico, esto ayuda en la identificación de varias formas elementales presentes dentro de la muestra. [31]

5.13 Microscopía Electrónica de Barrido

El microscopio electrónico de barrido (MEB) utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen.

Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (bobinas y filamento) que genera un haz de electrones para observar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, lo cual proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes.

Al incidir el haz de electrones sobre la muestra, interactúa con ella y se producen diversos efectos que serán captados y visualizados en función del equipo que utilizemos. Las aplicaciones del Microscopio electrónico de barrido son muy variadas, y van desde la industria petroquímica o la metalurgia hasta la medicina forense.[32]

5.14 Medición de espesores por ultrasonido

La medición ultrasónica de espesores es una técnica de ensayo no destructivo para la cual no es necesario cortar ni seccionar el material. Se trata de un método rápido, fiable y versátil que, a diferencia del uso de un micrómetro o un calibre, requiere el acceso a solamente una pared de la pieza a medir. Es por ello que se usa ampliamente para determinar el espesor de materiales como, por ejemplo, caños, tubos, válvulas, tanques, calderas y otros recipientes a presión, cascos navales o cualquier material sujeto a la corrosión y el desgaste.

Prácticamente cualquier material común de ingeniería se puede medir por ultrasonido. Por ende, es posible configurar medidores de espesor por ultrasonido para metales, plásticos, materiales compuestos, fibra de vidrio, cerámica y vidrio.[33]

6. METODOLOGÍA

A continuación, se menciona de manera resumida la experimentación que se llevó a cabo durante la realización de este trabajo, donde se menciona la caracterización del sustrato, preparación superficial, baños electroquímicos de Ni y Cr, así como su evaluación mecánica del recubrimiento. Además de las pruebas a los bloques patrón y medición de espesores.

6.1 Bloque patrón tipo I y II

6.1.1 Preparación los sustratos (Latón y Ac. Inoxidable 316L)

Para realizar los bloques patrón se utilizaron láminas de Latón comercial 70-30Zn y acero inoxidable 316L las dimensiones de los sustratos (ancho, largo y espesor) son: 35 mm x 100 mm x 2 mm marcado por la norma ISO 3252-3 de bloque de referencia tipo I y II [34].

En una lámina de cada material se midieron las dimensiones para las placas de acero y latón, en esta última se añadieron 20 mm para el ensayo de tensión (a lo largo y ancho); se marcaron 12 placas de latón y 12 de acero para aplicar recubrimiento a 9

placas de cada material, las cuales se cortaron con una cizalladora (*figura 5*). Las placas se prepararon superficialmente con un desbaste mecánico con el uso de lija de carburo de silicio grado 320, posteriormente se realizó una limpieza con alcohol absoluto, y se midió el espesor de los sustratos sin recubrimiento mediante la inspección por ultrasonido con un equipo DMS Go+ (*figura 6 y 7*).



Figura 5. Cizalladora.

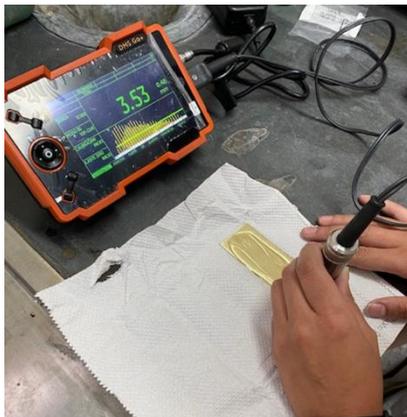


Figura 7. Medición de espesores con ultrasonido DMS Go+ en el sustrato de latón.



Figura 6. Medición de espesores con ultrasonido DMS Go+ en el sustrato de acero inoxidable 316L.

6.1.2 Sand-blasting

El sand-blast o limpieza con chorro se aplica a base de un abrasivo en este caso se usó la granalla de óxido de aluminio de 0.20mm (*figura 8*) a una presión de 8 bar, en la superficie de las placas de acero (*figura 9*), este proceso se realizó a distintos tiempos de 1, 2, 3 y 4 minutos respectivamente, para lograr diferentes rugosidades que se evaluarán con un rugosímetro y así obtener diferentes perfiles de anclajes.



Figura 8. Granalla de óxido de aluminio.



Figura 9. Sand-blasting sobre placa de acero 316L.

Nota: El proceso de sand-blasting solo se realiza para sustratos de acero inoxidable

6.1.3 Perfil de rugosidad

Se realizó un perfil de rugosidad a los sustratos de acero, por medio de un rugosímetro Mitutoyo SJ-301 para medir la distancia de los surcos o marcas ocasionadas por la granalla de óxido de aluminio utilizada en el proceso de sand-blasting. El rugosímetro es un dispositivo compacto y con un mecanismo de funcionamiento bastante sencillo. Hay que saber que la unidad de medida del rugosímetro es las micras expresadas en una serie de parámetros: como lo es la rugosidad aritmética (Ra).

Se limpia la superficie a medir para evitar que muestre resultados erróneos; se coloca el sensor del rugosímetro con punta de diamante sobre la superficie en posición vertical y con un ángulo de 90° con la que se realiza el barrido en toda la superficie de las láminas (figura 10).



Figura 10. Rugosímetro Mitutoyo SJ-30.

6.1.4 Caracterización metalográfica

6.1.4.1 Desbaste mecánico

A cada una de las placas para cada material se realizó un desbaste manual secuencial sobre la superficie, el cual se comenzó con lija de carburo de silicio grado 240, continuándose con lijas grados: 320, 400, 600, 800, 1000 y 1500; se giró 90° la posición de la placa entre cada cambio de la lija.

6.1.4.2 Pulido

Se llevó a cabo un pulido espejo manual con el fin de eliminar las rayas producidas en la operación de desbaste, para ello se utilizó un abrasivo de alúmina de 1 micra agregado a un paño microcloth en el que las partículas quedarán ancladas.

6.1.4.3 Ataque químico

Después del pulido metalográfico se realiza un ataque químico, con la finalidad de ejercer una influencia controlada en las propiedades ópticas en los límites de grano, fases o superficies del grano, lo que permitió la inspección al microscopio.

Se usó cloruro férrico con ácido clorhídrico ($FeCl_3$) y (HCl) para latón, mientras que para el acero se realizó un ataque electrolítico con ácido oxálico al 10% debido a sus altos contenidos de Cr; el principio del ataque electrolítico es el mismo que el del ataque químico, excepto que la muestra se coloca como un ánodo en la celda galvánica, lo que resulta en la eliminación de material de la superficie de la muestra.

6.1.4.4 Espectrometría de emisión óptica

Así mismo se realizó un análisis por OES para obtener la composición real de las placas de latón y de acero. La *Tabla 5* y *6* muestran la composición teórica según la norma ASTM B36 para un latón C26000 y ASTM A 240/A 240M para un acero inoxidable 316L.

Tabla 5. Composición química teórica de latón C26000 según norma ASTM B36.[35]

Tipo	% Cu	% Zn	% Pb	% Fe
C26000	68.5 - 71.5	28.38 - 31.38	< 0.07	< 0.05

Tabla 6. Composición química teórica de acero inoxidable 316L según norma ASTM A 240/a 240M.[36]

Tipo	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cr	% Ni	% Mo
316L	0.03	2.00	0.045	0.03	0.75	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00

6.1.5 Recubrimientos

6.1.5.1 Preparación de baño de níquel

Para la preparación de 1L del baño de níquel, se utilizaron las cantidades mostradas en la *tabla 1*, los tres reactivos se transfirieron a un matraz Erlenmeyer el cual se colocó en una parrilla eléctrica con agitación y temperatura moderada para evitar la liberación de vapores. Una vez que todo estaba disuelto se traspasó la solución a un matraz aforado de 1000 ml, posteriormente se colocó en un recipiente plástico para su almacenamiento.

6.1.5.2 Primera limpieza

Es importante llevar a cabo esta limpieza la cual se realizó a todos los sustratos, en una cuba de baño ultrasónico con alcohol absoluto por 10 min (*figura 11*), con el fin de eliminar impurezas como la grasa y el óxido de la superficie de los sustratos para asegurar una buena adherencia del recubrimiento de Ni.

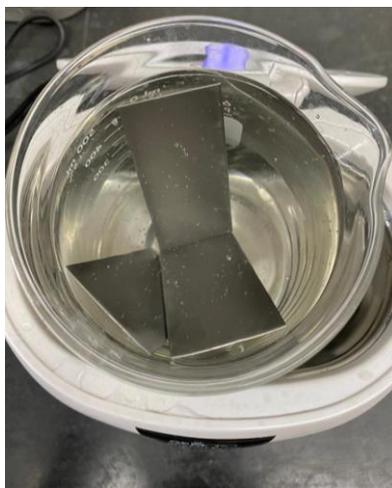


Figura 11. Cuba de baño ultrasónico para placas.

6.1.5.3 **Activación de la superficie**

Con el fin de lograr un mejor depósito de níquel, se llevó a cabo una inmersión de las placas por 5 minutos en una solución de sulfato de cobre (*figura 12*), lo cual activa la superficie metálica, ya que elimina la capa de óxido que haya quedado de la limpieza dejándola lista para el baño de Ni.



Figura 12. Inmersión de sustratos con recubrimiento de Ni en sulfato de cobre (CuSO₄) 1.18 M.

6.1.5.4 **Recubrimiento de Níquel**

Para realizar el baño de Ni y llevar un mejor control, se calentó la solución a 40°C y se mantuvo a dicha temperatura para cada baño de los sustratos de latón y acero (*figura 13*), y el pH de la solución en 3.5.



Figura 13. Calentamiento de solución de baño de níquel.

Posteriormente las placas se sumergieron en un baño de níquel, se aplicó una densidad de corriente de 2.64 A en sustratos de latón y de 1.75 A para sustratos de

acero, se usó como ánodo una placa de Ni como se observa en la *figura 14*, para llevar a cabo un mejor análisis de recubrimiento se varió el tiempo del baño, por lo que 3 placas se llevaron a 5 min y 3 placas a 7 min del baño.

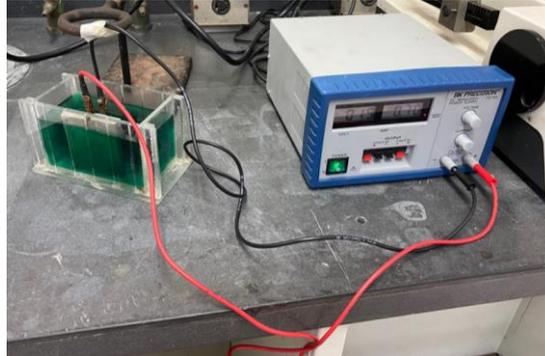


Figura 14. Montaje para los recubrimientos de Ni, fuente de poder, celda Hull de acrílico con ánodo de Ni y el sustrato como cátodo.

Las *figuras 15 y 16* muestran una placa de cada material después del baño de níquel donde el recubrimiento se muestra homogéneo sobre la superficie del sustrato, una vez cubierto se mide el espesor del recubrimiento de Ni mediante la inspección por ultrasonido (*figura 17*).



Figura 15. Sustrato de latón con recubrimiento de níquel.



Figura 16. Sustrato de acero inoxidable con recubrimiento de níquel.



Figura 17. Medición del espesor de recubrimiento de níquel por inspección por ultrasonido DNS Go+ a los sustratos de latón.

6.1.5.5 Segunda limpieza

Se requiere eliminar impurezas como la grasa y el óxido de la superficie de los sustratos por esta razón se lleva a cabo esta limpieza a todos los sustratos en una cuba de baño ultrasónico con alcohol por 10 min (*figura 18*), con la finalidad de asegurar una buena adherencia del recubrimiento de Cr.



Figura 18. Cuba de baño ultrasónico para placas de aceros.

6.1.5.6 Activación del Recubrimiento de Ni

Para ayudar a activar estos depósitos de níquel se llevó a cabo una inmersión de las placas de ambos materiales por 5 minutos en una solución de sulfato de cobre (*figura 19*), lo cual activa la superficie metálica de níquel, ya que elimina la capa de óxido que tiene dejándola lista para el baño de Cr.

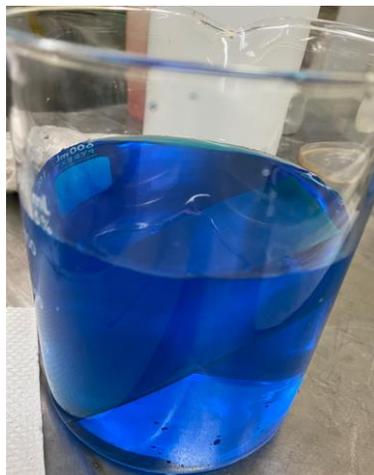


Figura 19. Inmersión de sustratos con recubrimiento de Ni en sulfato de cobre (CuSO_4) 1.18 M.

6.1.5.7 Preparación del baño de Cr

Para la preparación de 1L del baño de cromo, se pesaron 250 gr de ácido crómico (H_2CrO_4), los cuales se transfirieron a un vaso de precipitados con agua destilada, sobre la parrilla, a la cual se le aplicó agitación constante y un bajo calentamiento, una vez disuelto con una pipeta graduada de 5 ml y la propipeta se tomaron 2.5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), los cuales se vertieron en el vaso.

Se procedió traspasar la solución a un matraz aforado de 1000 ml, posteriormente se almacenó en un recipiente plástico con tapa.

6.1.5.8 Recubrimiento de Cr

Una vez activada la superficie del depósito de Ni, la placa es sumergida en el baño electrolítico de cromo el cual de igual forma que el recubrimiento anterior, fue necesario un calentamiento previo a $50^{\circ}C$ (figura 20), se repitió este procedimiento para cada placa.



Figura 20. Calentamiento de solución de baño de Cromo.

Una vez que se llega a esta temperatura se procede a hacer el recubrimiento con el sistema mostrado en la figura 21, se aplicó una corriente de 5.6 A para latón y una de 3.5 A para acero, se usó como ánodo una placa de Cr. Con la finalidad de obtener las mismas variables en ambos recubrimientos para el baño de Cr se aplicó el mismo tiempo de inmersión 3 y 5 min, por lo que se obtienen 3 placas a 5 min de baño y 3 placas a 7 min del baño.



Figura 21. Montaje para los recubrimientos de Cr, fuente de poder, celda Hull de acrílico con ánodo de Cr y cátodo de latón.

NOTA. Una vez que las placas cuentan con ambos recubrimientos se les denomina “bloque patrón”.

En la *figura 22* y *24* se muestran los bloques patrón después del baño de cromo (para el latón y el acero) donde el recubrimiento se muestra homogéneo sobre la superficie del sustrato, una vez cubierto se mide el espesor de los bloques patrón con recubrimiento de Cr mediante la inspección por ultrasonido (*figura 23* y *25*).



Figura 22. Bloque patrón de latón con recubrimiento de Ni-Cr.



Figura 23. Medición del espesor de recubrimiento de cromo por inspección por ultrasonido DMS Go+ a los bloques patrón de latón.



Figura 24. Bloque patrón de acero 316L con recubrimiento de Ni-Cr.



Figura 25. Medición del espesor de recubrimiento de cromo por inspección por ultrasonido DMS Go+ a los bloques patrón de acero 316L.

6.1.6 Tratamiento térmico

A los bloques patrón tipo II con recubrimientos de Ni-Cr con tiempos de 5 y 7 min respectivamente, se les efectuó un tratamiento térmico (*figura 26*) a 400°C en una mufla barnstead thermolyne (*figura 27*) por 1hr y enfriado al aire, con el fin de aumentar la dureza, lo que ayuda a la generación de grietas con mayor facilidad.

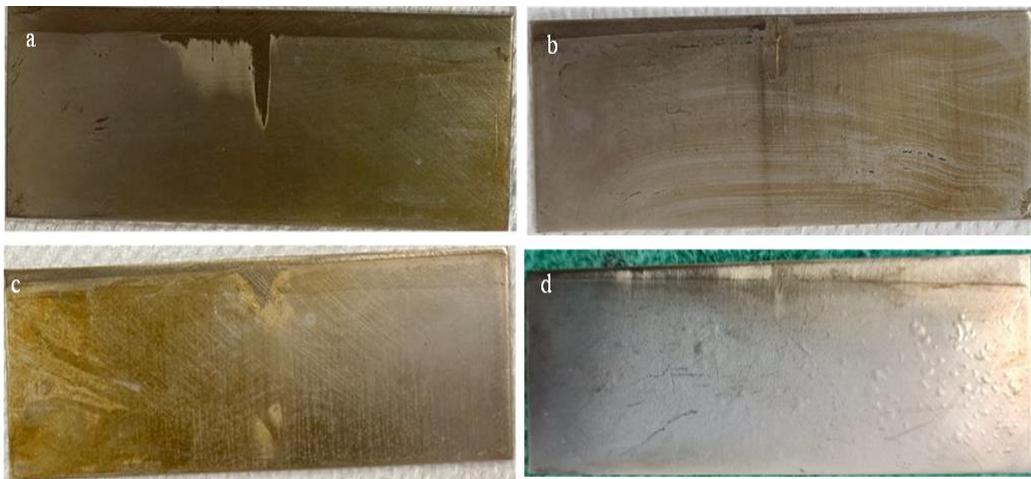


Figura 26. Bloques patrón con tratamiento térmico, a) bloque 1 con 5min, b) bloque 2 con 5 min, c) bloque 4 con 7 min y d) bloque 5 con 7min.



Figura 27. Mufla barnstead thermolyne.

6.1.7 Dureza

Para generar un perfil de durezas, primero se realizó una curva de calibración para establecer la carga de trabajo correspondiente, sobre el sustrato sin recubrimientos, con el uso de un durómetro marca SHIMADZU mostrado en la *figura 28*.

En la *figura 29* se muestra un ejemplo de la huella que de acuerdo a la curva fue la carga seleccionada para su medición. El perfil de dureza se realizó al sustrato sin recubrimiento, en bloques patrón con recubrimientos Ni-Cr a 5 min y a 7 min con el tratamiento térmico, para observar si existía un cambio en su dureza generado por los recubrimientos y el tratamiento térmico aplicado. El ensayo se llevó a cabo bajo la norma ASTM: E 92 – 17. [37]

A otros dos de los sustratos con tratamiento térmico se les realizó un patrón comparador de indentaciones (*figura 30*) se usó un durómetro Buehler Hardness Rockwell Tester (*figura 31*) bajo la norma ASTM E 18 – 22 [38]. En la *figura 32* se ilustra la posición del indentador para la realización de las indentaciones; se usaron el indentador de “1/16” y el de punta de diamante, en el bloque patrón 2 (5 min) se realizaron 4 indentaciones bajo las condiciones señaladas en la *tabla 7*. Para el bloque patrón 4 (7 min) se realizaron 5 indentaciones con las condiciones de la *tabla 8*.

Posterior a esto se realizó una medición de cada una de las indentaciones realizadas por medio del software image-pro plus, antes y después de realizar la inspección por

líquidos penetrantes con el fin garantizar la reproducibilidad de los resultados después de la aplicación.

Tabla 7. Condiciones de las indentaciones del bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr de 5 min.

Número de indentación	Condiciones
1	Indentador de 1/16 con carga de 60Kg (escala HRF)
2	Indentador de 1/16 con carga de 150Kg (escala HRG)
3	Indentador punta de diamante con carga de 60Kg (escala HRA)
4	Indentador punta de diamante con carga de 150Kg (escala HRC)

Tabla 8. Condiciones de las indentaciones del bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr de 7 min.

Número de indentación	Condiciones
1	Indentador de 1/16 con carga de 100Kg (escala HRB)
2	Indentador punta de diamante con carga de 60Kg (escala HRA)
3	Indentador punta de diamante con carga de 100Kg (escala HRD)
4	Indentador de punta de diamante con carga de 150Kg (escala HRC)
5	Indentador punta de diamante con carga de 150Kg (escala HRC)



Figura 28. Micro durometro SHIMADZU (HMV).

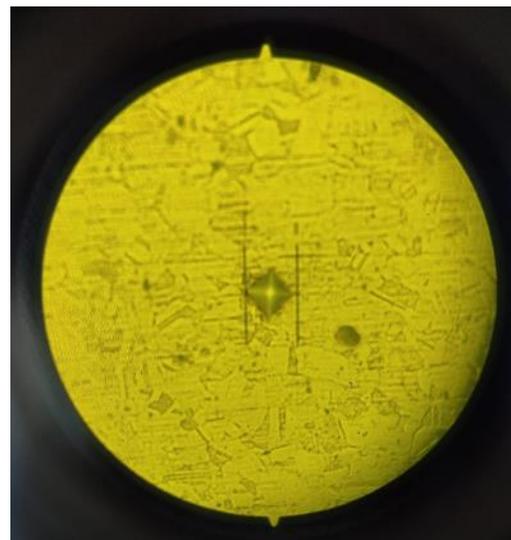


Figura 29. Huella en HMV.



Figura 30. Bloques patrón comparadores de indentaciones, a) bloque 2 y b) bloque 4.



Figura 31. Buehler Hardness Rockwell Tester.



Figura 32. Posición del indentador.

Nota: El tratamiento térmico, así como el ensayo de dureza solo se realiza a sustratos de acero inoxidable.

6.1.8 Ensayo de tensión

El realizar el ensayo de tensión (*figura 33*) se permite conocer las características del material en el momento en que se somete al esfuerzo de tracción, con lo cual se determinó el punto de fractura y para conocer el rango de deformación y carga donde se puedan generar las grietas controladas para el bloque patrón tipo I. este ensayo se realizó a la placa de latón y acero de llegada, al bloque patrón con recubrimiento de Ni-Cr a 5 min, así como al bloque patrón con recubrimiento de Ni-Cr a 7 min, respectivamente para cada material, se aplicó una razón de carga de 5

mm/seg el ensayo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento bajo la norma ASTM E-08[15].



Figura 33. Ensayo de tensión, bloque sustrato sin recubrimiento.

6.1.9 Microscopia electrónica de barrido

Se utiliza el microscopio electrónico de barrido Jeol 5900 LV (*figura 34*) se realizó un análisis por espectrometría de energía dispersa de rayos X (EDS por sus siglas en inglés), se obtuvieron imágenes de electrones secundario y análisis EDS, un mapeo elemental de las zonas donde se aplicó el recubrimiento, se midieron los espesores de los recubrimientos en el bloque patrón I y en el bloque patrón II.



Figura 34. Microscopio electrónico de barrido, Jeol 5900

6.1.10 Líquidos penetrantes

Al ser un ensayo no destructivo ayuda a determinar y cuantificar los defectos superficiales generados la *figura 35a* se ilustra el estuche de líquidos penetrantes implementados en el ensayo. Se realizó una primera limpieza en la que se aplicó una capa uniforme de limpiador para remover grasas, óxidos, entre otras; transcurrido el tiempo se aplicó uniformemente un líquido penetrante (*figura 35b y 36a*) de un material visible con un tiempo de permanencia de 10 min sobre la superficie que se examina, lo cual permite entrar en discontinuidades abiertas.

Una vez transcurrido el tiempo de permanencia, se elimina el exceso de penetrante, para aplicar la segunda limpieza por 4 minutos y finalmente aplicar el revelador (*figura 35c y 36b*), en un ángulo de 45° y a una distancia de 10 a 15 cm, el revelador se deja actuar por 5 minutos y después se procede a realizar la inspección visual.

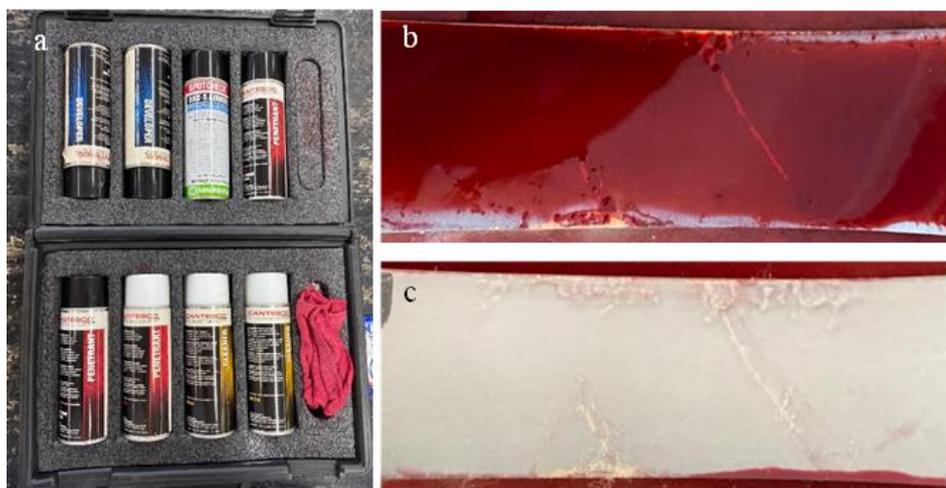


Figura 35. a) estuche de líquidos penetrantes, b) bloque patrón tipo I con liquido penetrante y c) bloque patrón tipo I con revelador.



Figura 36. Bloque patrón tipo II, a) con liquido penetrante y b) con revelador.

Para la evaluación del lavado de los penetrantes coloreados se realiza sobre los sustratos a diferentes rugosidades, se aplica una capa homogénea de penetrante con tiempo de permanencia de 10 minutos como se observa en la *figura 37*, al término de este no se aplica limpiador, solo se retira manualmente el penetrante y así evaluar cuánto líquido penetrante se queda como “remanente” de acuerdo a la rugosidad de la superficie, esto debido a que al inspeccionar piezas el acabado superficial puede generar falsas indicaciones si no se tiene una buena limpieza.

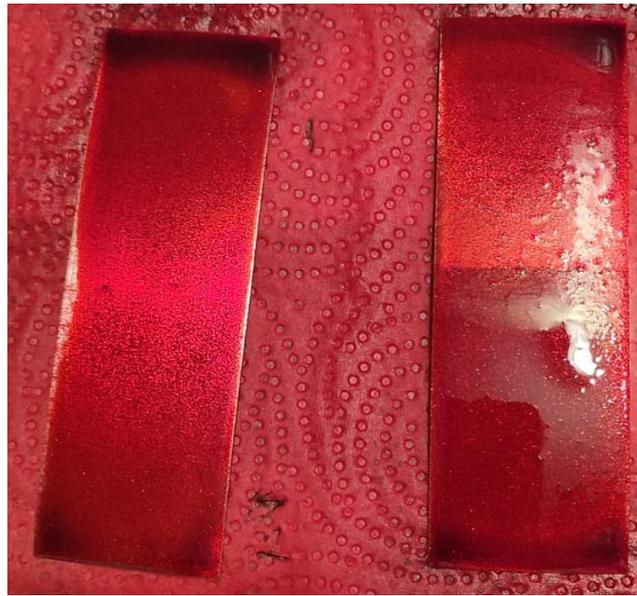


Figura 37. Aplicación del líquido penetrante sobre placas de acero con diferente rugosidad.

Para el ensayo con líquidos penetrantes fluorescentes, se lleva a cabo una limpieza con un tiempo de 3 min, al cabo de este tiempo se aplica una capa uniforme del líquido penetrante el cual se deja actuar por 20 min (*figura 38a y 39a*), finalmente se retira el exceso de éste y se aplicó el limpiador por 5 minutos transcurrido el tiempo se puede realizar la inspección bajo luz negra en un área oscurecida (*figura 38b y 39b*).

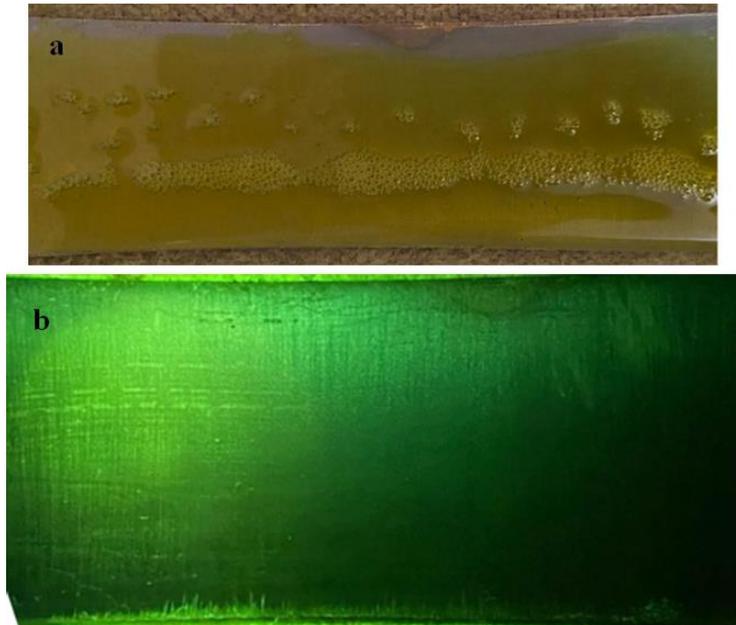


Figura 38. Bloque patrón tipo I, a) con líquido fluorescente y b) inspección bajo luz negra.

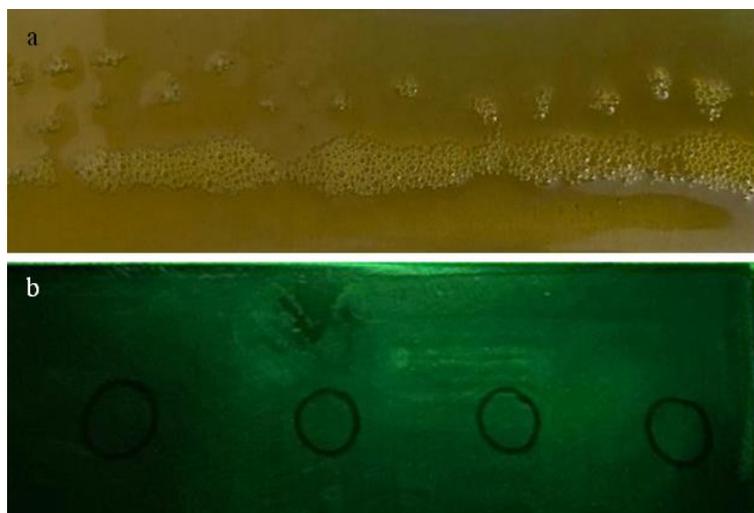


Figura 39. Bloque patrón tipo II, a) con líquido fluorescente y b) inspección bajo luz negra.

Para la evaluación del lavado de los penetrantes fluorescentes se realiza sobre los sustratos a diferentes rugosidades, se aplica una capa homogénea de penetrante con tiempo de permanencia de 20 minutos como se observa en la *figura 40*, al término de este se retira manualmente el penetrante y así evaluar cuánto líquido penetrante se queda como “remanente” de acuerdo a la rugosidad de la superficie, esto debido a que al inspeccionar piezas el acabado superficial puede generar falsas indicaciones si no se tiene una buena limpieza.

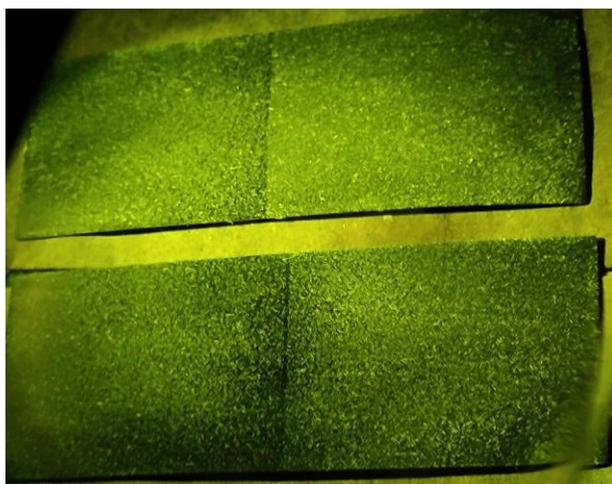


Figura 40. Resultado de la aplicación del líquido penetrante sobre placas con diferente rugosidad.

7. RESULTADOS

7.1 Bloque I

7.1.1 Composición química

Se realizó un análisis químico por espectrometría de emisión óptica (OES), se obtuvieron los resultados reportados en la *tabla 9*, la composición química del sustrato el cual se comparó con los elementos indicados en la norma ASTM B36 (*tabla 5*), la cual corrobora que es un latón C26000 (70/30) es de la serie de latón amarillo, que tiene la mayor ductilidad [39]. Al tener un porcentaje en peso de 70% Cu y 29,9 de Zn que está dentro de los rangos de la norma, además la adición de níquel disminuye la tendencia de los latones a tener corrosión bajo tensión, el estaño aumenta la resistencia a la corrosión.

Tabla 9. Composición química experimental del sustrato de latón mediante espectrometría de emisión óptica (OES).

Elemento	Cu	Zn	Pb	Fe	Ni	Sn	Sb
% peso	70.05	29.9	0.0096	0.015	0.0018	0.0022	0.011

7.1.2 Caracterización Metalográfica

Al realizar el análisis metalográfico sobre la superficie después del revelado químico se encontró que el sustrato de latón tiene granos alargados con orientación (*figura 41*) al ser una lámina por el proceso de conformado (laminación en caliente), ya que ayuda a mejorar las propiedades mecánicas. De acuerdo a la norma ASTM B 19-20 [40] en la *figura 41* se tiene un tamaño de grano entre 0.060-0.150 mm lo que concuerda con la metalografía reportada en la literatura (*figura 42*) esto puede deberse a la pequeña cantidad de Fe agregado que reduce el crecimiento de grano.

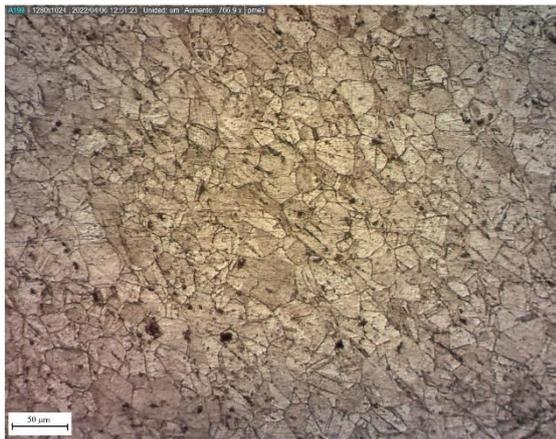


Figura 41. Metalografía del sustrato de latón sobre la superficie. atacada con cloruro férrico y ácido clorhídrico.

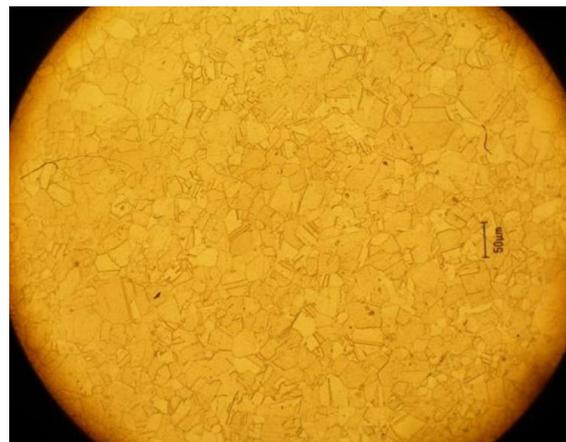


Figura 42. Microestructura reportada en la literatura de un latón C26000.[41]

7.1.3 Recubrimientos

En la *figura 43 y 44* se muestran los bloques patrón con recubrimiento de níquel con tiempos de 5 y 7 minutos respectivamente, se nota una ligera capa de color gris la cual guarda un poco de la tonalidad del amarillo característico del latón, además para ambos tiempos la película del recubrimiento es homogénea de acuerdo a la coloración del recubrimiento sobre el sustrato.

En el recubrimiento de cromo la tonalidad gris en las placas es evidente, se puede notar el cambio de coloración en las zonas donde estaba sujeto el caimán, así mismo esta película formada se observa brillante, esto es notorio para placas con tiempo de permanencia de 5min (*figura 45*) que en las de 7 min (*figura 46*).

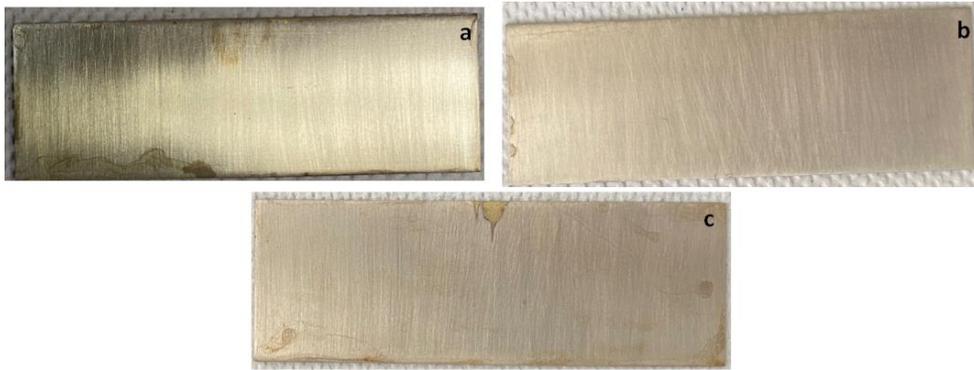


Figura 43. Recubrimientos de Ni de 5 minutos, a) placa 1, b) placa 2, c) placa 6.

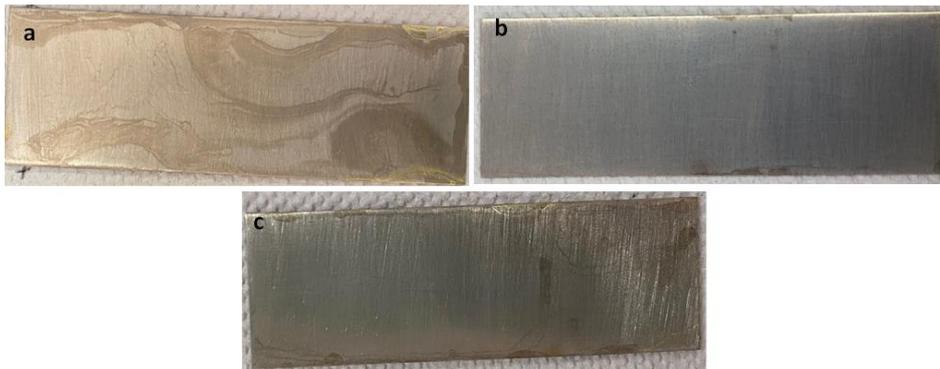


Figura 44. Recubrimientos de Ni de 7 minutos, a) placa 3, b) placa 4 y c) placa 5.

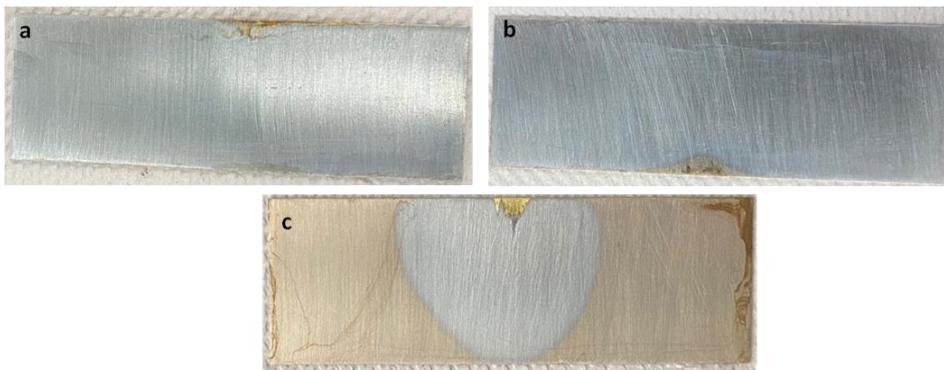


Figura 45. Recubrimientos de cromo de 5 minutos, a) placa 1, b) placa 2 y c) placa 6.

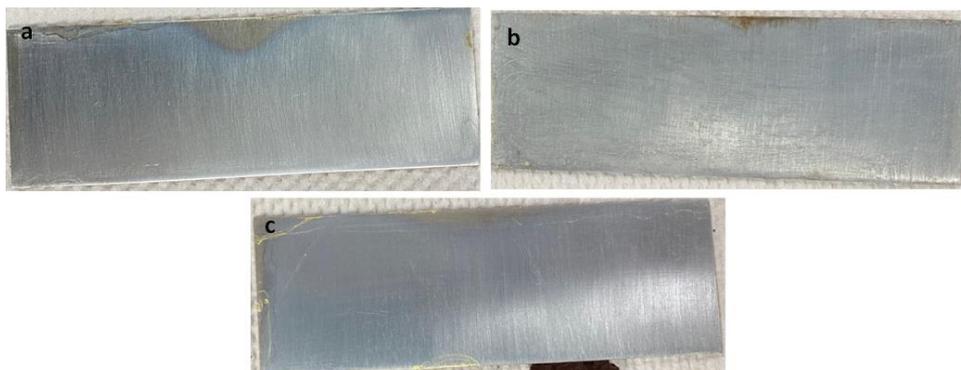


Figura 46. Recubrimientos de cromo 7 minutos, a) placa 3, b) placa 4 y c) placa 5.

7.1.4 Espesores del sustrato con recubrimiento

En la *Tabla 10* se muestran los valores promedio de los espesores sin recubrimiento, con recubrimiento de Ni y con recubrimiento de Cr sobre la superficie de las placas para tiempos de 5 y 7 minutos respectivamente. Se observa que al aplicar el recubrimiento de níquel el espesor incrementa significativamente 0.06mm en placas con tiempo de permanecía de 5 min, donde se encuentra un mayor depósito es en placas con tiempo de permanencia de 7 minutos ya que el espesor aumento en 0.07 mm, para las placas de 5 min el incremento fue de 0.02 mm, para las de 7 min de 0.013 mm. Los bloques patrón mostraron homogeneidad en el recubrimiento Ni-Cr en las placas de 5 min.

Tabla 10. Valores promedio de los espesores de las placas sin recubrimiento, con recubrimiento de Ni y recubrimiento de Cr para 5 y 7 minutos.

Placa	Tiempo	Recubrimiento (mm)		
		Sin	+ Ni	+Ni +Cr
1	5 min	3.45	3.51	3.522
2	5 min	3.45	3.51	3.53
3	7 min	3.52	3.6	3.612
4	7 min	3.52	3.58	3.592
5	7 min	3.52	3.58	3.59
6	5 min	3.46	3.52	3.55

En la *figura 47* se presenta un gráfico de barras en él se perciben que los espesores de llegada de los sustratos no son homogéneos entre sí, esto puede deberse desde el proceso de laminado debido a que pudieran estar desnivelados los rodillos o a la falta de normatividad durante el proceso, ya que, como se observa en el gráfico se tiene una desviación estándar de aproximadamente 0.037, los sustratos con menor espesor fueron empleados para los recubrimientos de 5 minutos, mientras que los sustratos con un mayor espesor se usaron para los recubrimientos de 7 min.

En los recubrimientos de Ni de 5 minutos, se observa que los tres sustratos obtuvieron espesores homogéneos entre sí al tener una desviación estándar de 0.008, en los recubrimientos de Ni de 7 min la desviación estándar es de 0.013 y se obtuvieron los mayores espesores.

Los recubrimientos de Cr a 5 min son homogéneos entre sí, al igual que en los recubrimientos de 7 min, ya que se obtuvo una desviación estándar de 0.014 en ambos tiempos; como se puede observar en el gráfico para los recubrimientos de Cr en tiempos de 5 min hubo un incremento en los espesores, para el tiempo de depósito de 7 min a pesar de que fue en donde se generó un mayor espesor con respecto al depósito de 5 min, fue en donde se mostró un menor espesor sobre el recubrimiento de Ni que se tenía.

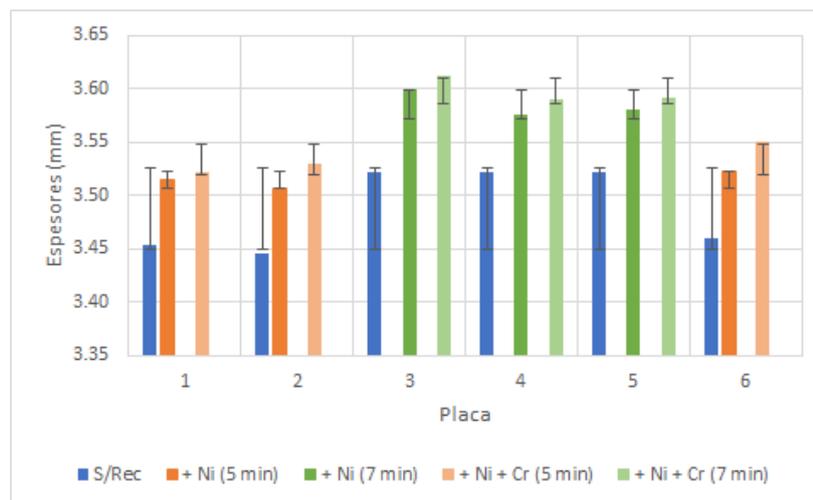


Figura 47. Comparativa de espesores de los recubrimientos.

7.1.5 Microscopía electrónica de barrido

El análisis de microscopía electrónica de barrido se realizó en la sección transversal a uno de los bloques patrón (figura 48), en la figura 48a se observa la imagen señal de electrones secundarios, el metal base (latón) se encuentra en la parte inferior de un gris claro, mientras que el recubrimiento de níquel se percibe de un tono claro y brillante, seguido de un gris oscuro que es el recubrimiento de cromo. Esto se percibe mejor en la figura 48b donde se realizó un mapeo de los elementos presentes de acuerdo con su distribución, los cuales se presentan en la figura 48c, en verde se muestra el aluminio procedente del porta muestras, en la parte inferior se puede ver que solo hay cobre y zinc (en color amarillo y naranja respectivamente) que son los elementos principales del latón, enseguida hay una capa de níquel representada en color rosa y sobre esta se encuentra una capa de cromo (de color azul).

Se midió el espesor de cada recubrimiento (*figura 48b*), el recubrimiento de níquel tiene un espesor de $1.11\ \mu\text{m}$, mientras que el espesor del recubrimiento de cromo es de $1.8\ \mu\text{m}$.

Comparados con los mostrados *Tabla 8* podemos observar que se esperaban espesores de recubrimiento de Ni-Cr alrededor de $0.079\ \mu\text{m}$, sin embargo, en la prueba observamos que se obtuvo un recubrimiento mayor de lo que se esperaba de $3.15\ \mu\text{m}$, donde el recubrimiento de cromo fue significativo; la medición de espesores con MEB resulta más exacta que la técnica de ultrasonido. Se concluye que se obtuvo un buen recubrimiento

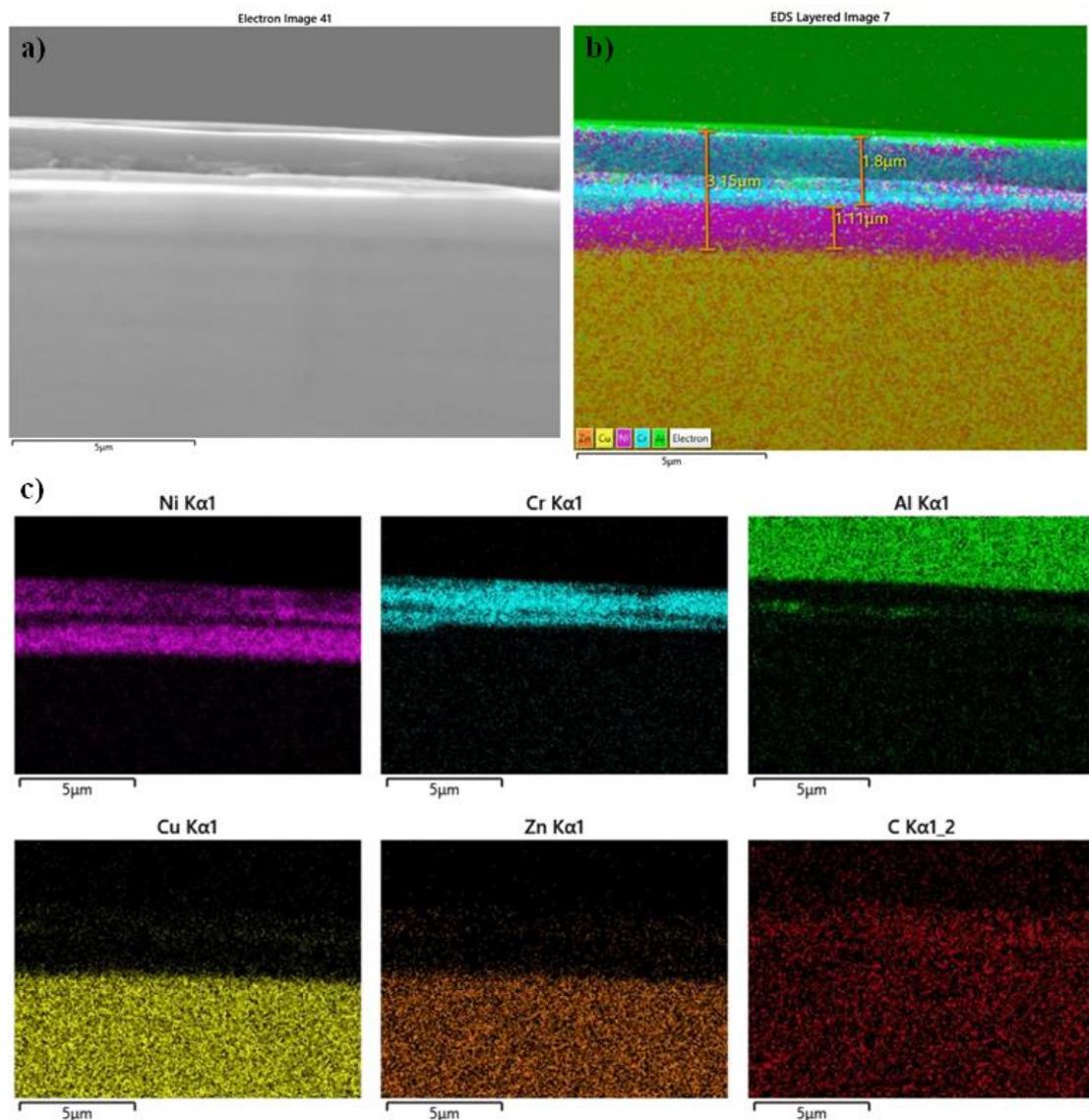


Figura 48. a) Imagen señal de electrones secundarios, b) imagen de las diferentes capas identificadas mediante mapeo por EDS con medición del espesor de los recubrimientos y c) mapeo de elementos presentes.

7.1.6 Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión se realizaron en una placa sin recubrimiento, en un bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr por 5 min y en un bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr por 7 min hasta llegar a la fractura (*figura 50*) con los datos arrojados durante el ensayo de cada sustrato se realizó la construcción de la curva esfuerzo deformación mostrada en la *figura 49* la que proporciona el rango de deformación del bloque patrón, con lo que se determinó un porcentaje de deformación para la generación de las grietas controladas; se puede observar que el latón de llegada (sin recubrimiento) mostró bajas propiedades como se observa en la *figura 50*.

De acuerdo al comportamiento frágil que se aprecia en la curva de color azul (latón) que se presenta en la *figura 49* donde se percibe un UTS de 258 MPa, es la primera probeta en llegar a la fractura y como se advierte fue la que tuvo una menor deformación, esto se puede ver en la *figura 50a* donde se tiene poca formación del cuello, además la fractura está situada en uno de los extremos de la probeta.

Para el bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr por 7 min en la curva de color amarillo se observa un mejor efecto en las propiedades con respecto al latón sin recubrimiento, ya que se nota un incremento en la zona elástica y zona plástica, al presentar una mayor área bajo la curva el comportamiento es dúctil, la deformación total fue de 17.3% tal como se ve en la *figura 50c* donde la formación del cuello es evidente con un porcentaje de reducción de 26.7% y la fractura ocurre en el centro del patrón o dentro de la pulgada de acuerdo a la norma ASTM E-08, también se aprecia que el esfuerzo de fractura y el esfuerzo máximo son el mismo (453 MPa), esto es característico de un material frágil.

Finalmente, en la curva de color naranja se observa un mejor efecto en las propiedades del latón debido a que se logró obtener un buen recubrimiento de Ni-Cr sobre el latón con tiempo de 5min, se percibe un comportamiento similar a un acero de bajo contenido carbono, ya que, como se aprecia se tiene un zona de fluencia, se obtuvo un UTS de 580 MPa, así como un mayor valor del módulo de Young (183.9 MPa) la fractura en este bloque ocurrió casi en la parte media y el cuello que se formó es más pronunciado que en las probetas anteriores (*figura 50b*), lo cual se comprueba en la *figura 51*, donde se observa que fue la probeta que sufrió mayor deformación,

por lo que con recubrimientos de Ni-Cr por 5 minutos se logró obtener un material más dúctil.

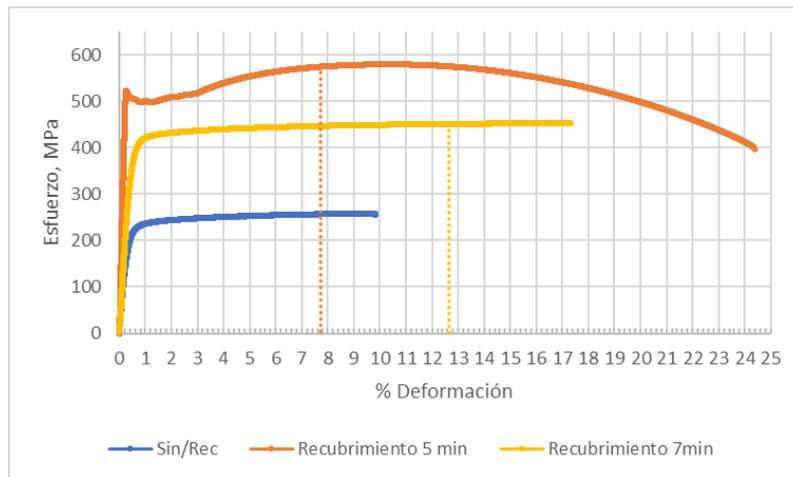


Figura 49. Gráfico de la curva esfuerzo deformación del sustrato de latón sin recubrimiento y de los bloques patrón recubiertos de Ni-Cr (5 y 7 min), señala el 75% del UTS.

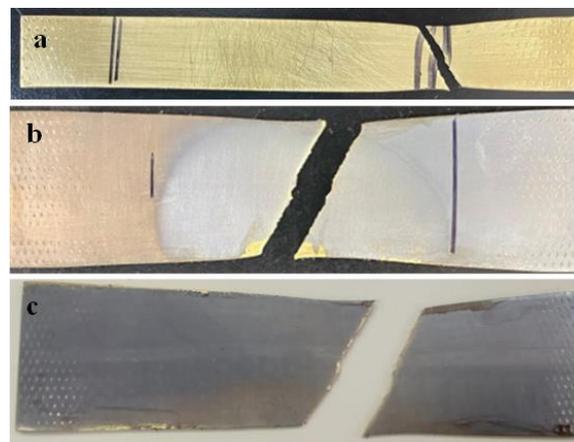


Figura 50. Probetas fracturadas después del ensayo de tensión; a) sustrato sin recubrimiento, b) bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr de 5 min y c) bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr de 7 min.

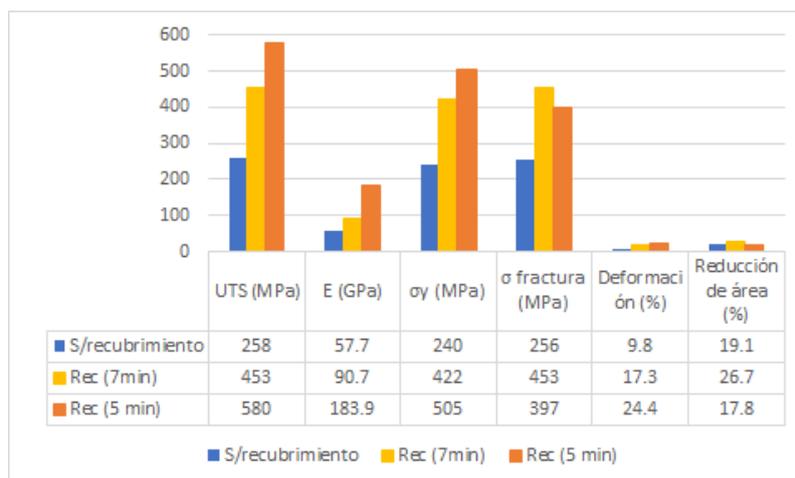


Figura 51. Recopilación de los datos arrojados por la curva esfuerzo / deformación.

Se puede observar en la *figura 52* los bloques patrón a los cuales se les aplicó una carga para ser tensionada al 75% del UTS y generar grietas controladas a partir de la curva esfuerzo-deformación. Los bloques presentan una ligera forma de copa y cuello, las grietas son formadas horizontalmente ya que se aplicó una carga longitudinal para la deformación, estas son notorias en los bloques *figura 52b* y *52c* de forma vertical, apenas detectables, en estos mismos bloques se presentó un desprendimiento del recubrimiento.

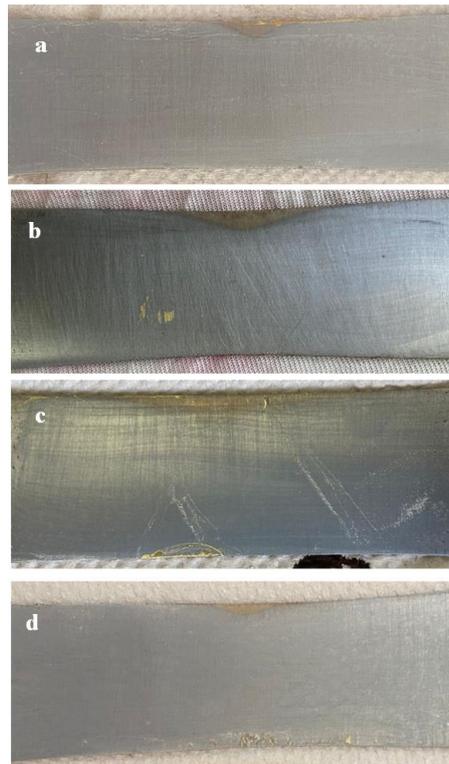


Figura 52. Bloques patrón tensionados, a) bloque 1 (5 min), b) bloque 2 (5 min), c) bloque 5 (7 min) y d) bloque 4 (7 min).

7.1.7 Líquidos penetrantes

Al tener los bloques patrón con defectos controlados, se aplica el ensayo por líquidos penetrantes coloreados y fluorescentes como se muestra en las siguientes figuras. En el bloque patrón marcado como 1 con recubrimiento de 5 min al aplicar los líquidos penetrantes coloreados (*figura 53a*) no se observan grietas sobre el recubrimiento de Cr, sin embargo, en relieve de un rojo tenue muestra falsas indicaciones que se formaron en el recubrimiento y que son visibles por el revelador, a pesar de que para

este bloque patrón se usaron líquidos penetrantes nuevos, la sensibilidad de estos no fue lo suficientemente buena para revelar las grietas formadas al 75% de deformación. Por el contrario, con la aplicación de un líquido fluorescente en la *figura 53b* de este bloque se pueden ver grietas muy finas de manera horizontal, se logran observar debido a que estos líquidos tienen mayor sensibilidad; estas grietas las cuales en un extremo son pequeñas, mientras que en el centro las grietas se alargan ya que en esta zona es donde comenzó la formación del cuello, asimismo presenta una aceptable brillantez del penetrante.

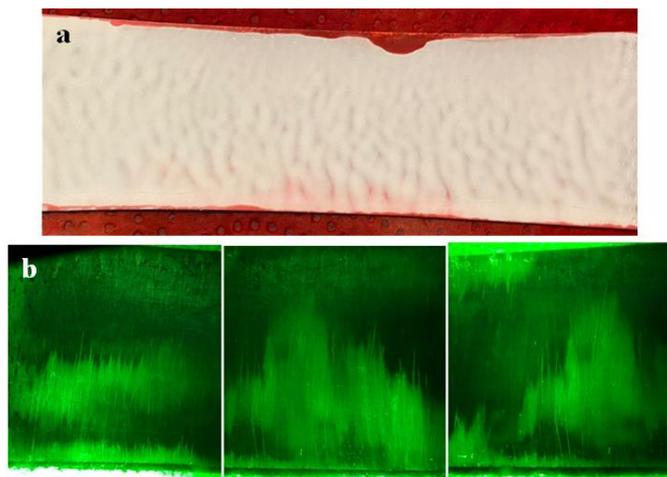


Figura 53. Bloque patrón 1 (5 min) con líquidos penetrantes nuevos, a) coloreados y, b) fluorescentes.

En el bloque patrón marcado como 5 con recubrimiento de 7 min con líquidos penetrantes coloreados (*figura 54a*) se observan en relieve de un rojo tenue grietas finas verticales, ya que el recubrimiento de Ni y el de Cr el agrietamiento fue de forma característica, asimismo para este bloque de 7 minutos se obtuvo un desprendimiento del recubrimiento, en este caso se ocuparon líquidos coloreados antiguos. Con líquidos fluorescentes (*figura 54b*) se perciben grietas finas de forma horizontal y continuas a lo ancho de todo el bloque, se puede ver que en las zonas donde se presenta el desprendimiento del recubrimiento se ve oscurecido además las grietas se ven interrumpidas al llegar a esas zonas, en este caso la brillantez penetrante no es tan buena.

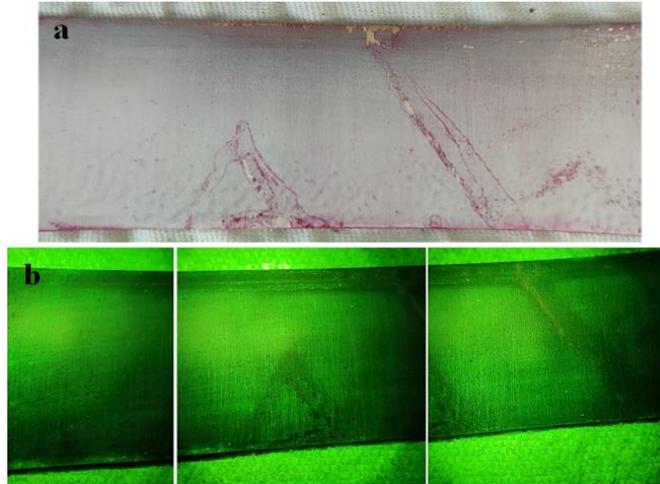


Figura 54. Bloque patrón 5 (7 min) con líquidos penetrantes antiguos, a) coloreados y, b) fluorescentes.

Para el bloque patrón 2 con líquidos coloreados usados en la figura 55a no se observan grietas, se requiere de una ampliación con ayuda de lupa, por lo que se realizó el ensayo con penetrante fluorescente (figura 55b) que ayuda a la detección de grietas por ser más sensible, sin embargo, las grietas apenas son apreciables por ser finas, en el centro se muestra un comportamiento en direcciones opuestas encontrándose en el centro del bloque donde se crea una especie de rombos en esta zona.

En este bloque la brillantez del fluorescente es muy baja en comparación a los anteriores, lo que diría que se vio afectada por el tipo de luz negra usada.

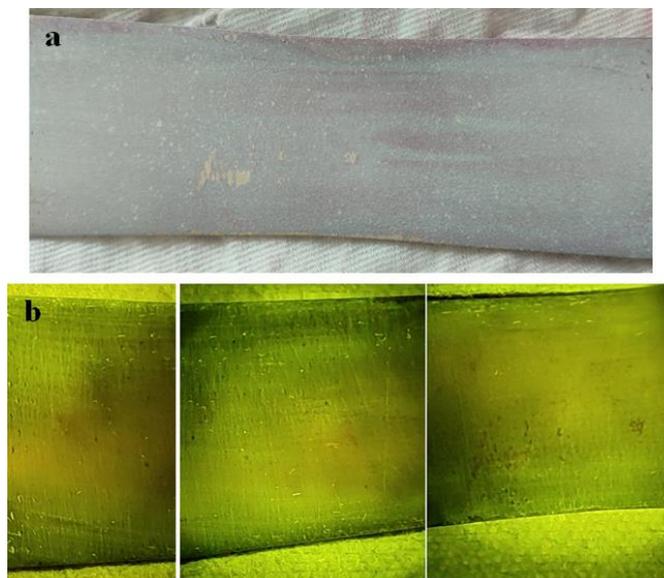


Figura 55. Bloque patrón 2 (5 min) con líquidos penetrantes antiguos, a) coloreados y, b) fluorescentes.

Ahora bien, el bloque patrón 4 (*figura 56a*) a diferencia del bloque 1 con líquidos coloreados nuevos no se observan grietas en relieve del recubrimiento de Ni, solo se aprecian pequeñas grietas en los bordes del bloque, donde se tuvo un desprendimiento del recubrimiento, por esta razón se hizo uso del penetrante con mayor sensibilidad como los fluorescentes en el que se detectan grietas finas del recubrimiento, las cuales están de forma horizontal, son grandes en el centro que es donde se formó el cuello (*figura 56b*).



Figura 56. Bloque patrón 4 (7 min) con líquidos penetrantes nuevos, a) coloreados y, b) fluorescentes.

Cabe destacar que, para los líquidos penetrantes fluorescentes antiguos, la brillantez se ve afectada, sin embargo, aún cuenta con suficiente brillo para que se puedan apreciar las grietas en el barrido, ya que, tiene baja tensión superficial por lo cual tienen mayor penetración.

Para los líquidos penetrantes coloreados antiguos, afectó la limpieza del revelador ya que este era difícil de retirar, así mismo no se lograba una capa uniforme del penetrante en los sustratos por falta del solvente.

7.2 Bloque II

7.2.1 Caracterización metalográfica

Se realizó un análisis químico por espectrometría de emisión óptica (OES), el cual detecto los resultados *de la tabla 11* de la composición química del sustrato estos se cotejaron con los marcados en la norma ASTM A 240/A 240M (*tabla 6*), donde se corrobora que se trata de un acero inoxidable 316L es decir de un acero cromo níquel.

Al tener un porcentaje en peso de 16.31% Cr y 10.15 % de Ni que están dentro de la norma, además de contener molibdeno.

Tabla 11. Composición química experimental del sustrato de acero 316L mediante espectrometría de emisión óptica (OES).

Elemento	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Cu	Co
% Peso	68.97	0.024	0.512	0.829	16.31	10.15	1.993	0.443	0.301	0.212

Al realizar el análisis metalográfico el acero presenta una estructura austenítica (*figura 57*) lo cual concuerda con la metalografía reportada en la literatura (*figura 58*) para acero 316L.

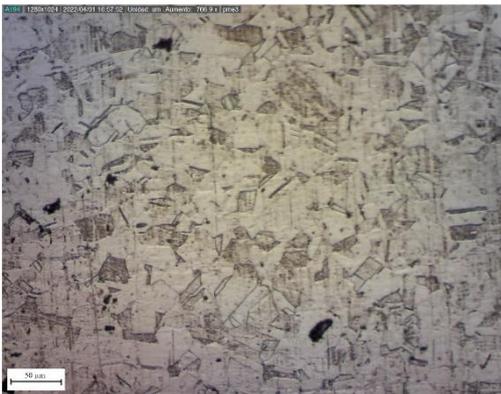


Figura 57. Metalografía sobre la superficie del sustrato de acero 316L, atacada con ácido oxálico.



Figura 58. Microestructura reportada en la literatura de un acero 316L.[42]

7.2.2 Recubrimientos

En la *figura 59 y 60* se muestran los sustratos con recubrimiento de níquel con tiempos de 5 y 7 minutos respectivamente, en las placas se muestra una ligera capa de color gris opaco, se nota la diferencia de la tonalidad ya que se dejó una parte de la placa sin recubrimiento, en la placa 1 (*figura 59a*) es donde mejor se aprecia esta diferencia de coloración, debido al caimán que lo sujetaba.

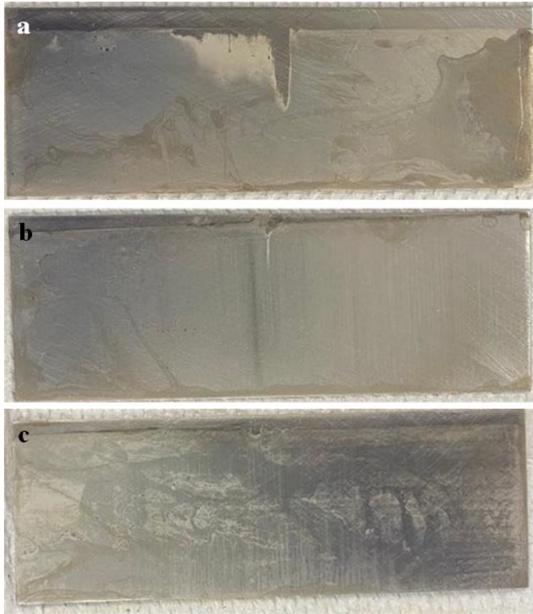


Figura 59. Recubrimientos de Ni de 5 min sobre sustratos de acero, a) placa 1, b) placa 2 y c) placa 3.

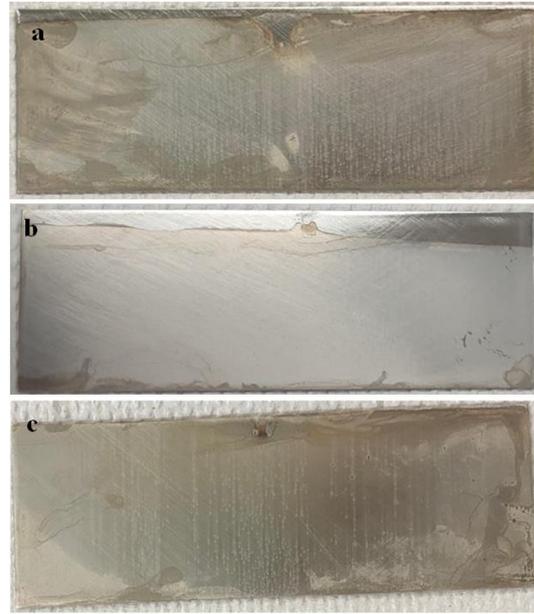


Figura 60. Recubrimientos de Ni de 7 min sobre sustratos de acero, a) placa 4, b) placa 5 y c) placa 6.

En el recubrimiento de cromo (*figuras 61 y 62*) la tonalidad “gris” en las placas es evidente, se puede notar el cambio de coloración en las zonas donde estaba sujeta por el caimán, además, se trató de cubrir por debajo del de Ni con el fin de observar estas tonalidades, donde el recubrimiento aún se aprecia opaco, lo anterior es notorio en la *figura 62* que con tiempos donde los recubrimientos no son tan homogéneos.

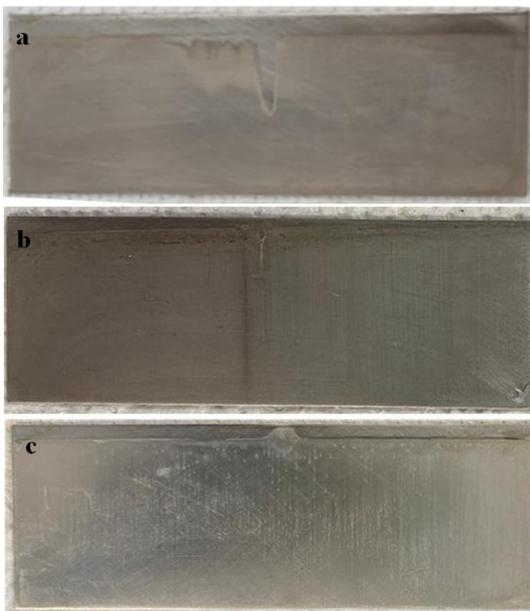


Figura 61. Recubrimientos de Cr de 5 min, a) bloque patrón 1, b) bloque patrón 2 y c) bloque patrón 3.



Figura 62. Recubrimientos de Cr de 7 min sobre sustratos de acero, a) placa 4, b) placa 5 y c) placa 6.

7.2.3 Espesores del sustrato con recubrimiento.

La *tabla 12* muestra los valores promedio de los espesores sin recubrimiento, con recubrimiento de Ni y recubrimiento de Cr sobre la superficie de las placas para 5 y 7 minutos respectivamente. Se puede observar que al aplicar el recubrimiento de níquel el espesor muestra un cambio significativo, donde se encuentra un mayor depósito en placas con tiempo de permanencia de 7 minutos, mientras que para los recubrimientos de cromo no son tan apreciables por inspección por ultrasonido DMS Go+. En la *figura 63* se presenta un gráfico de barras en el cual se puede notar que los espesores en los sustratos de llegada son homogéneos entre sí, ya que, como se observa tiene una desviación estándar de 0.0.

En los recubrimientos de Ni de 5 minutos, se observa que los tres sustratos obtuvieron espesores casi homogéneos entre sí, lo mismo ocurrió con los espesores de Ni de 7 min para ambos tiempos de depósito de Ni ya que se obtuvo una desviación estándar de 0.04; sin embargo, en los depósitos de 7 min el espesor máximo es de 2.41 mm.

Los recubrimientos de Cr de 5 min fueron homogéneos entre sí, ya que se obtuvo una desviación estándar de 0.01 con respecto a los recubrimientos de 7 min, debido a que se alcanzó una desviación estándar de 0.07; se puede observar en el gráfico para los recubrimientos de Cr para el tiempo de 5 min hubo un incremento en los espesores con respecto al que se tenía con el recubrimiento de Ni, sin embargo, para el tiempo de depósito de 7 min es donde tuvo incremento con respecto al espesor obtenido con Ni de aproximadamente 0.05 mm.

Tabla 12. Valores promedio de los espesores sin recubrimiento, con recubrimiento de Ni y recubrimiento de Cr para 5 y 7 minutos.

Placa	Tiempo	Recubrimiento (mm)		
		Sin	+ Ni	+Ni + Cr
1	5 min	2.26	2.28	2.31
2	5 min	2.26	2.26	2.32
3	5 min	2.26	2.33	2.33
4	7 min	2.26	2.34	2.36
5	7 min	2.26	2.41	2.49
6	7 min	2.26	2.33	2.37

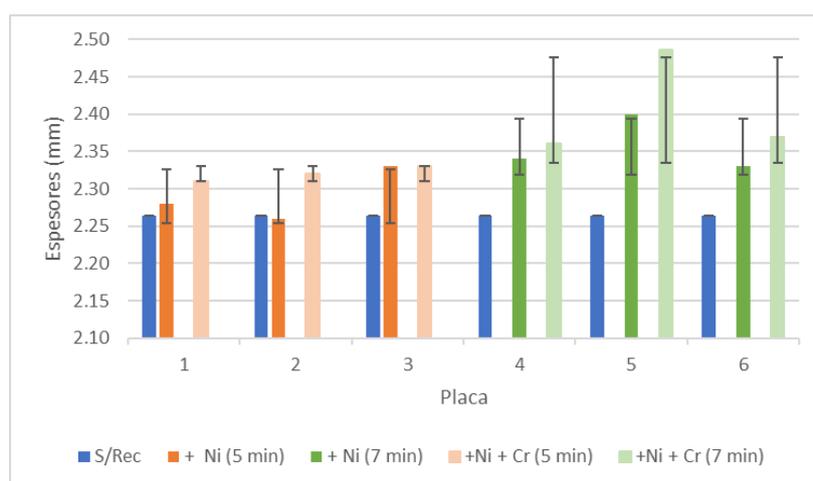


Figura 63. Gráfico de desviación estándar de los espesores de los recubrimientos.

7.2.4 Tratamiento térmico y Dureza

La tabla 13 muestra la curva de calibración aplicada a diferentes cargas con ciclo de trabajo de carga y descarga de 15s, para determinar la mejor huella observada a 40 aumentos en la carga de trabajo como 1.961N donde se generó una dureza de 211 HV. Con esta carga se realizó un perfil de dureza para el sustrato sin recubrimiento (figura 64) como se observa en el gráfico de barras con esta carga se obtuvieron durezas casi homogéneas a lo largo de la placa con una desviación estándar de 11.1.

Tabla 13. Curva de calibración de carga de trabajo.

Carga	HV
245.2 mN	270
490 mN	342
980 mN	257
1.961 N	211

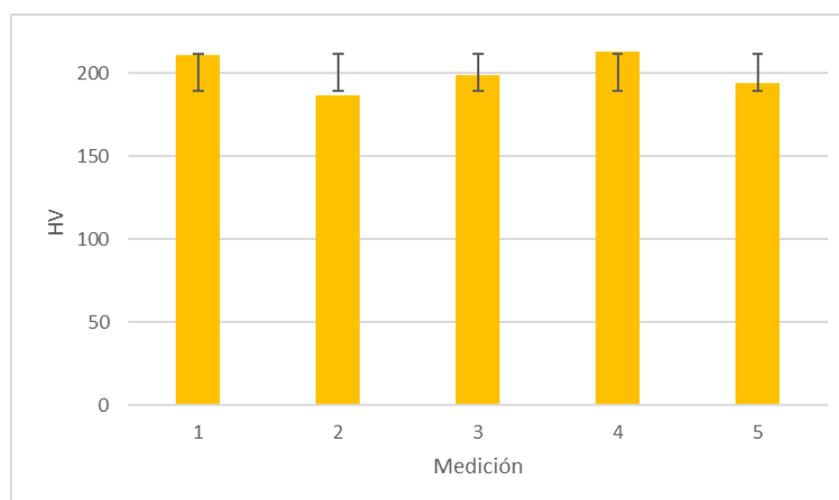


Figura 64. Gráfica de mediciones de dureza de sustrato sin recubrimiento con carga de 1.961 N.

Se tuvo en cuenta la carga de trabajo para realizar un perfil de dureza para los sustratos 1 y 5 como se observa en la *tabla 14* los valores promedios de este son de 200.65 HV equivalente a 93 HRB, que se encuentra por debajo de lo que marca la norma ASTM A 240/A 240M que dice que es de 95 HRB, sin embargo, este valor es aceptable.

Al término del tratamiento térmico aplicado a estos mismos bloques se le realizó nuevamente un perfil de dureza con carga de 2.942 mN por obtener la mejor huella según la curva de calibración de dureza, como resultados se obtuvo un incremento en la dureza en ambos casos, cabe destacar que el bloque 5 tiene la mayor dureza a causa de la generación de un recubrimiento con mayor espesor debido al tiempo dado en este proceso de 7 min en comparación con los otros.

Tabla 14. Valores promedio de dureza HV.

Sustratos	S/Recu. (1.961 N)	TT (2.942 mN)
1 (5 min)	200.8	243.6
5 (7 min)	200.5	244

En la *figura 65* se presenta un gráfico de barras donde se percibe qué para el bloque patrón de 5 min (azul) donde se obtuvieron las menores durezas a lo largo de todo el bloque, sin embargo, se obtuvo una desviación estándar de 7.8, el bloque de 7 min en donde se consiguieron las mayores durezas con valores de 244mN, con una desviación estándar de 12.63.

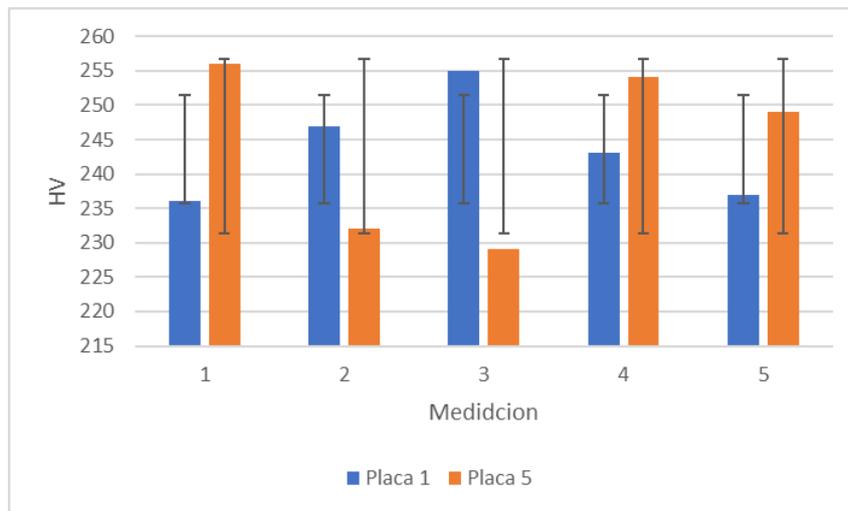


Figura 65. Gráfica de mediciones de dureza de placa 1 y 5 con desviación estándar.

Con el fin de que la prueba sea reproducible se realizaron indentaciones a un bloque patrón para cada tiempo de recubrimiento a lo largo de estos, se toman fotografías a través del microscopio metalográfico a 50X, y son medidas a través del software imagen-pro plus.

La *figura 66* se muestra las dimensiones de las indentaciones realizadas en el bloque patrón 2 (5 min), en el que se realizaron 4 indentaciones bajo las condiciones de la *tabla 7*, en la *figura 66c* se observa la indentación 2 la huella midió $336.5197\mu\text{m}$, la *figura 66b* mide $112.1679\mu\text{m}$ es la indentación 3, por último la indentación 4 dejó la huella de la *figura 66a* que mide $267.3863\mu\text{m}$, por lo cual es la indentación que se observa mejor; la indentación uno no dejó una huella que se pudiera observar por ello que no se tiene la medición.

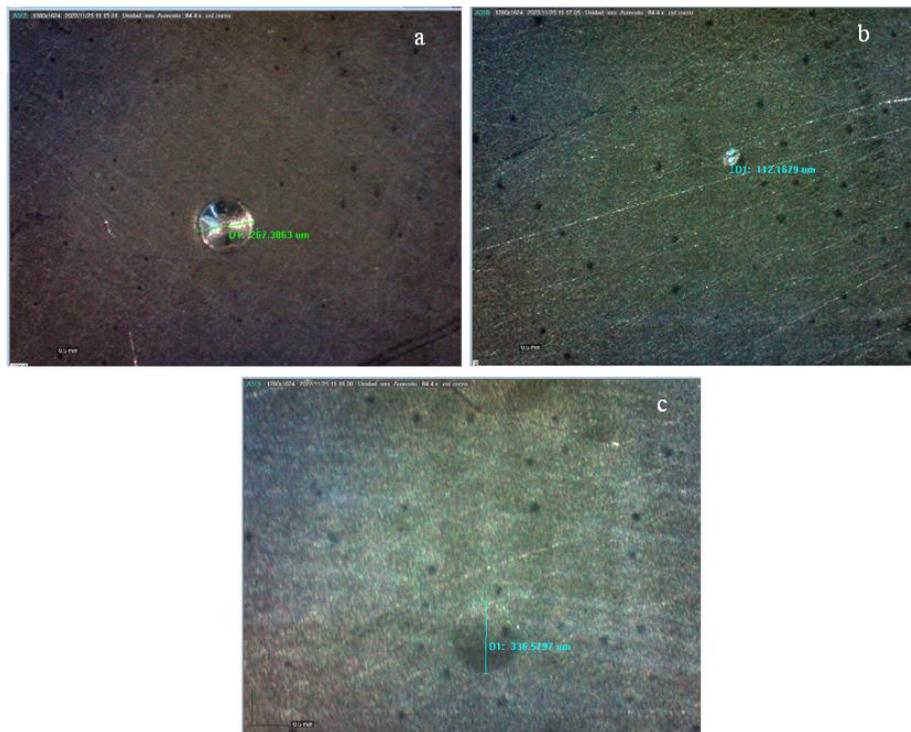


Figura 66. Medición de marcas de indentación sobre bloque patrón 2 (5 min) con el software image-pro plus a) carga de 150 Kg con indentador de punta de diamante, b) carga de 60 Kg con punta de diamante y c) carga de 150 Kg con indentador de 1/16.

Las dimensiones de las indentaciones del bloque patrón 4 (7 min) se muestran en la *figura 67*, a este bloque se le realizaron 5 marcas con las condiciones de la *tabla 8*, la indentación uno se muestra en la *figura 67a* la cual dejó una huella de 115.5140 μm , las indentaciones 2 y 3 son las mostradas en la *figura 67b* y *67c* que muestran una huella de 105.6213 μm y 112.17 μm respectivamente, finalmente la *figura 67d* y *67e* corresponden a las indentaciones 4 y 5 de dimensiones de 257 μm .

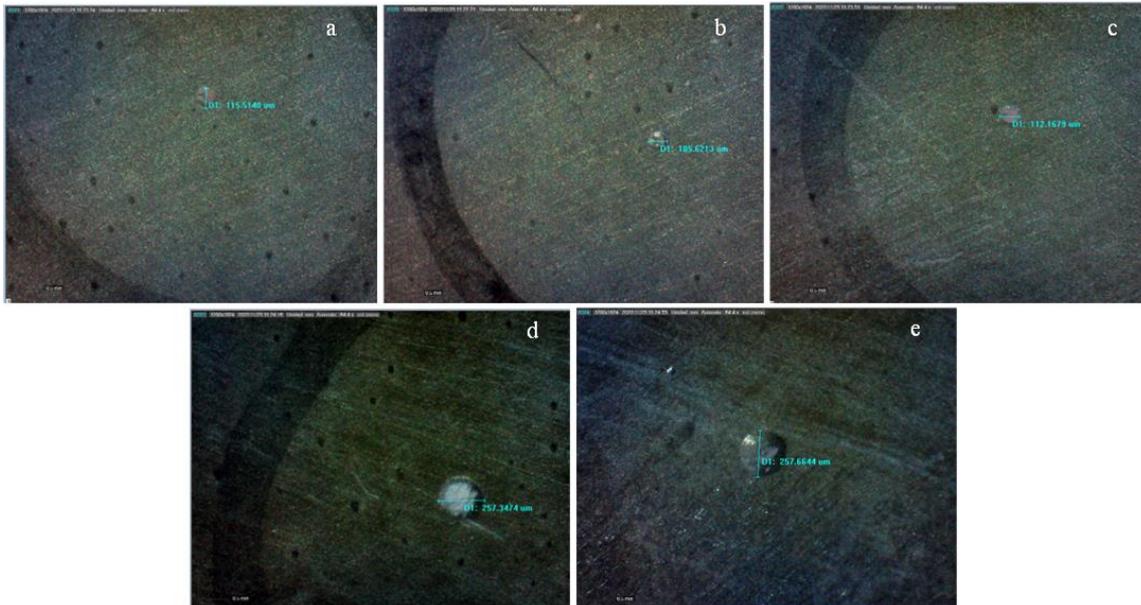


Figura 67. Medición de marcas de indentación sobre bloque patrón 4 (7 min) con el software image-pro plus a) carga de 100 Kg con indentador de 1/16, b) carga de 60 Kg con indentador de punta de diamante, c) carga de 100 Kg con indentador de punta de diamante, d) carga de 150 Kg con indentador de punta de diamante y e) carga de 150 Kg con indentador de punta de diamante.

7.2.5 Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión se realizaron en una placa sin recubrimiento, en un bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr por 5 min con tratamiento térmico y en un bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr por 7 min con tratamiento térmico hasta llegar a la fractura (figura 69), se realizó la construcción de la curva esfuerzo deformación indicada en la figura 68, con los datos arrojados de cada sustrato se calcularon los datos mostrados en la figura 70.

De acuerdo al comportamiento que se aprecia en la curva de color azul (acero sin recubrimiento) el sustrato tiene un UTS de 371.5 MPa, y un esfuerzo de fractura de 356 MPa, con lo que fue la primera probeta en llegar a la fractura y tuvo una menor deformación, esto se puede ver en la figura 69a donde se observa poca formación del cuello, además de que la fractura está situada en uno de los extremos de la probeta.

Para el bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr por 7 min con tratamiento térmico (curva verde) se observa un comportamiento similar al del sustrato, está curva presenta una mayor área bajo la curva lo que corresponde a una mayor ductilidad, en el gráfico de la figura 70 se advierte con mayor claridad que en este bloque patrón el esfuerzo de fractura es mayor con respecto de la probeta sin recubrimiento (393 MPa),

así como una deformación total del 14.9%, en la *figura 69c* se observa la formación del cuello y la fractura de la probeta cerca de la parte media de la misma.

Para la probeta de 5 min con tratamiento térmico (*figura 68, curva naranja*) se obtuvo el mayor UTS con un valor de 416.5 MPa, también fue la probeta que tuvo la mayor deformación plástica con un 19.2% y fue la última probeta en llegar a la fractura con un esfuerzo de 403 MPa, en la *figura 69b* se advierte que la fractura ocurrió en uno de los extremos de la probeta y fue la probeta con el cuello más marcado. Si se comparan los resultados obtenidos en el ensayo de dureza con los de tensión (*figura 70*), se encuentra que, al aumentar la dureza, aumentan significativamente las propiedades del material como lo es el UTS, el límite elástico, el porcentaje de deformación, lo que cae dentro de un comportamiento como lo presentan en la norma ASTM A 240/A 240M para acero 316L.

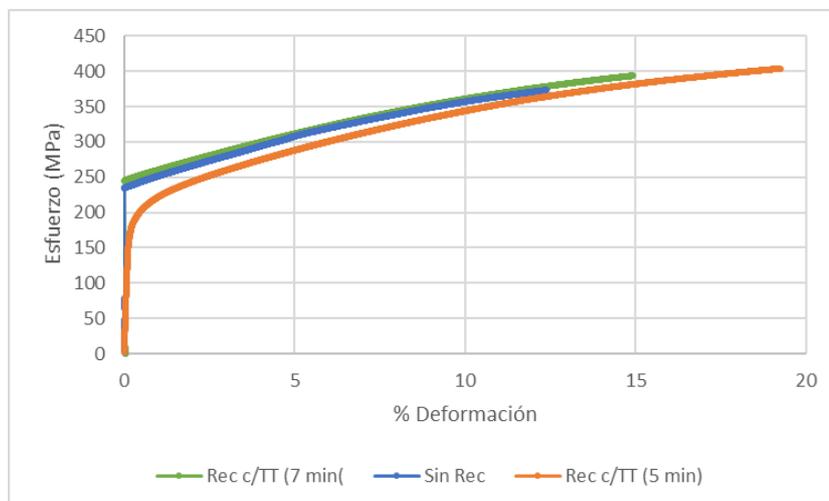


Figura 68. Curva esfuerzo deformación del sustrato sin recubrimiento y de los bloques patrón recubiertos de Ni-Cr (5 y 7 min).



Figura 69. Probetas fracturas después del ensayo de tensión; a) sustrato sin recubrimiento, b) bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr de 5 min y c) bloque patrón con recubrimiento Ni-Cr de 7 min.

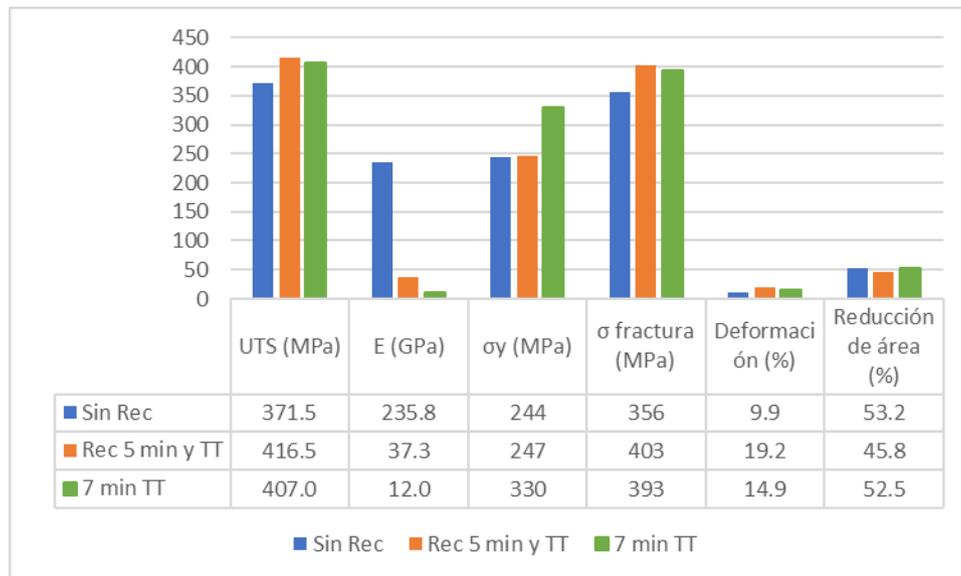


Figura 70. Recopilación de los datos arrojados por la curva esfuerzo / deformación.

7.2.6 Microscopía electrónica de barrido

A uno de los bloques patrón se le realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido (figura 71), en la figura 71a se observan dos tonos de gris, el oscuro es el metal base (acero), mientras que el claro es el recubrimiento. Se realizó un mapeo de los elementos presentes (figura 71b) el metal base está en color verde, en la figura 71c se observa que tiene hierro y cromo, lo cual concuerda con un acero inoxidable; sobre el color verde (combinación del azul y amarillo) se observa una capa de color rosa que corresponde al níquel según la figura 71c, en esa misma zona se ve que hay poca cantidad de cromo, debido a que el recubrimiento de cromo después del tratamiento térmico interdifundió en el níquel, debido a que la cantidad depositada de cromo fue muy poca y los átomos de cromo se cohesionaron con los de níquel. Se realizaron dos mediciones del espesor del recubrimiento en diferentes zonas (figura 71b) las cuales son de 5.45 μm y 5.36 μm , por lo cual se considera como un recubrimiento homogéneo.

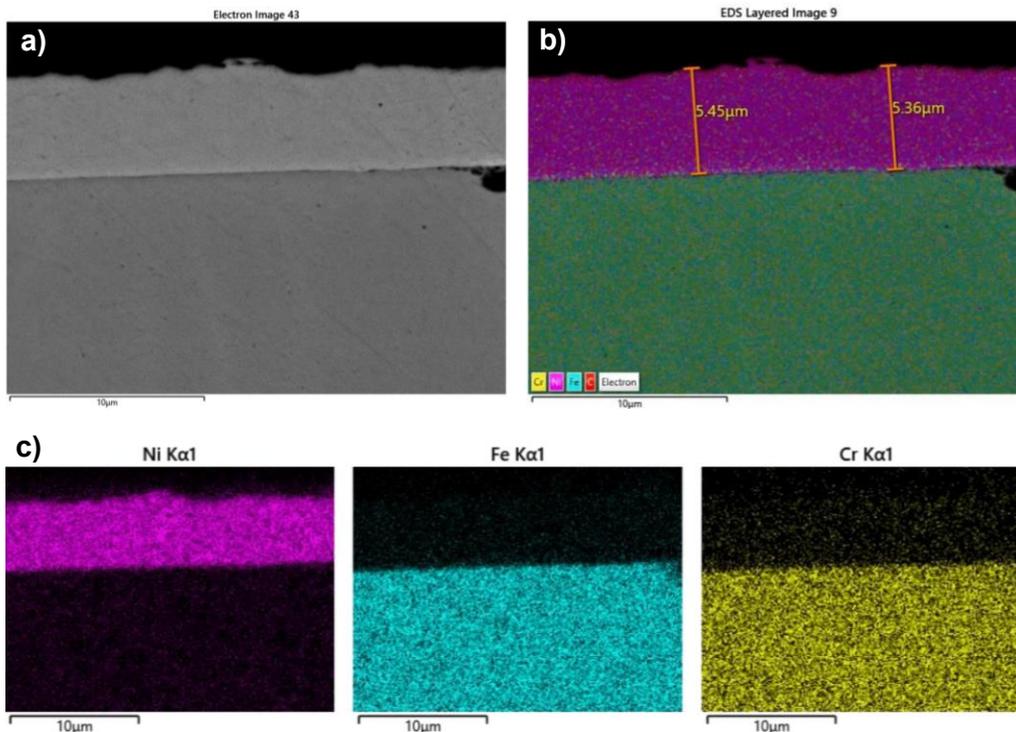


Figura 71. a) Imagen señal de electrones secundarios, b) imagen de electrones en capas EDS con medición del espesor de los recubrimientos y c) mapeo de elementos presentes.

7.2.7 Líquidos penetrantes

Al bloque patrón 2 después de realizarle las indentaciones ya mencionadas y descritas anteriormente con la finalidad de generar grietas artificiales, y así poder observarlas con líquidos penetrantes, como se presenta en la *figura 72a*, con el penetrante de contraste de color no se aprecian las marcas de indentación; sin embargo, con penetrante fluorescentes se alcanzan a percibir las marcas indicadas con las flechas de color rojo.

Las huellas de indentación se presentan de la primera a la cuarta bajo las condiciones de la *tabla 7*, la que se aprecia menos es en la *figura 72e* correspondiente a la indentación 1, posteriormente la huella de la *figura 72d* que corresponde a la indentación 2, seguido de la indentación 3 de la huella en la *figura 72c*, no obstante, se distingue con mayor claridad la huella en la *figura 72b*, debido a que se trata de la indentación 4 que fue la que dejó una huella de mayor tamaño; por ello se midió las dimensiones de la huella con el software image-pro plus como se observa en la *figura 73*.

En la *tabla 15* se muestran las dimensiones de las indentaciones sin líquidos penetrantes (*figura 66*), y de la indentación 4 sin y con la aplicación de líquidos penetrantes, debido a que fue la indentación que más se marcaba, el tamaño de la indentación sin líquidos penetrantes es de 267. 386 μm mientras que con líquidos penetrantes fue de 263 μm .

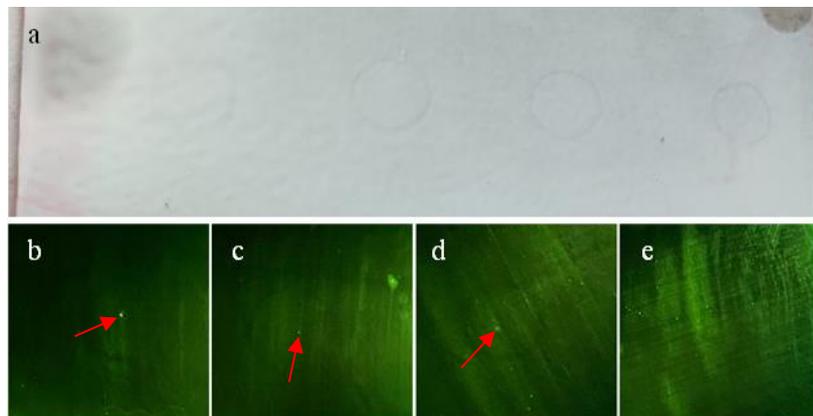


Figura 72. Bloque patrón 2 (5 min) con líquidos penetrantes a) coloreados, b, c, d y e) fluorescentes.

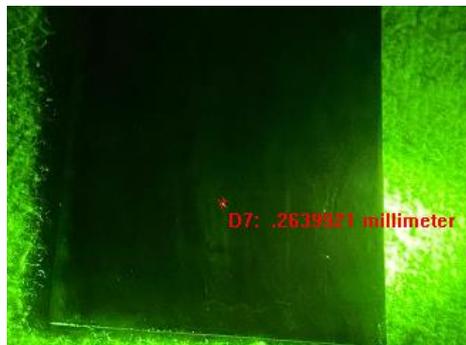


Figura 73. Medición de la huella de indentación con el software image-pro plus.

Tabla 15. Dimensiones de las indentaciones del bloque patrón 2 (5 min) antes y después de la aplicación de líquidos penetrantes.

Numero de indentación	Dimensiones (μm)	
	Sin Lp	Con Lp
1 e	No dejo huella visible	
2 d	336.519	
3 c	112.168	
4 b	267.386	263.400

En el bloque patrón 4 se realizaron indentaciones bajo las condiciones de la *tabla 8* para evaluar las huellas dejadas con líquidos penetrantes, en la *figura 74a* con líquidos penetrantes coloreados no se alcanzan a observar las marcas; con líquidos

fluorescentes indicadas con las flechas en color rojo, la huella en la *figura 74b* es la que menos se logra distinguir, debido a que se trata de la indentación 1, las huellas de las *figuras 74c, 74d, 74e y 74f* se realizaron con el indentador de punta de diamante, la *figura 74c* corresponde a la indentación 2, la indentación 3 se observa en la *figura 74d*, las indentaciones 4 y 5 son las huellas de la *figura 74e y 74f* respectivamente, es por ello, que las marcas son apreciables; con el software image-pro plus se obtuvieron las dimensiones de estas mismas indentaciones.

En la *tabla 16* se muestran las dimensiones de las indentaciones sin líquidos penetrantes (*figura 67*), y de la indentación 4 y 5 sin y con la aplicación de líquidos penetrantes, debido a que fueron las indentaciones que más se notaban, el tamaño de la indentación 4 sin líquidos penetrantes es de 257.347 μm , mientras que con la aplicación de líquidos penetrantes (*tabla 74e*) es de 428.248 μm que corresponde a la huella de la *figura 75a*; las dimensiones de la indentación 5 sin líquidos penetrantes es de 257.664 μm mientras que la *figura 75b* con líquidos penetrantes es de 250.361 μm corresponde a la huella de la *figura 74f*.

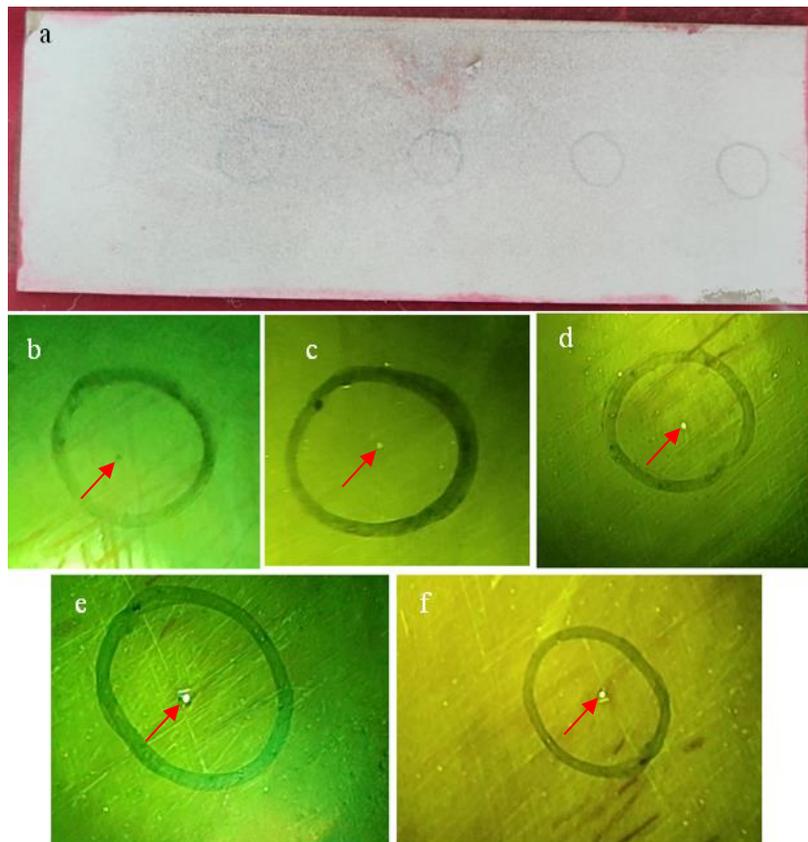


Figura 74. Bloque patrón 4 (7 min) con líquidos penetrantes, a) coloreados, b, c, d, e y f) fluorescentes.

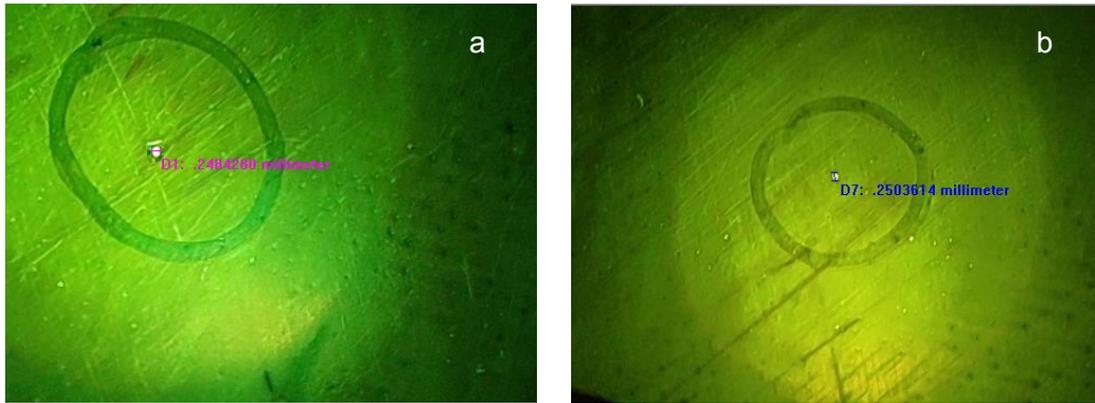


Figura 75. Medición de las huellas de indentación con el software image-pro plus.

Tabla 16. Dimensiones de las indentaciones del bloque patrón 4 (7 min) antes y después de la aplicación de líquidos penetrantes

Numero de indentación	Dimensiones (μm)	
	Sin Lp	Con Lp
1 b	115.514	
2 c	105.621	
3 d	112.17	
4 e	257.347	248.428
5 f	257.664	250.361

A partir de las indentaciones medidas a través del software se puede hacer una comparación antes y después de aplicar líquidos penetrantes, como se muestra en la *tabla 13* donde las dimensiones de las indentaciones después de aplicar líquidos penetrantes fluorescentes son de 3 a 9 μm más pequeñas que las dimensiones de las indentaciones al no tener líquidos penetrantes, esto debido a que las mediciones antes de la aplicación de la técnica se mide toda la circunferencia de la huella mientras que después de la aplicación se mide solamente la discontinuidad que se genera con la aplicación de la carga que puede ser la profundidad y/o penetración de la huella.

En la *figura 76* se presentan las placas que se emplearon para sand-blasting como se mencionó anteriormente, esto con la finalidad de evaluar la facilidad de limpieza del penetrante de acuerdo a la rugosidad de la superficie.

Para la placa de la *figura 76a* se ocupó un tiempo de proyección del abrasivo de un minuto, a simple vista esta sección fue la que mostró una menor rugosidad en coloración gris opaco, para la *figura 76b* por dos minutos, mientras que para la *figura 76c* el abrasivo se proyectó por 3 minutos y finalmente durante 4 minutos en la placa

de la *figura 76d* la cual mostro la mayor rugosidad visualmente y con una tonalidad gris brillante.

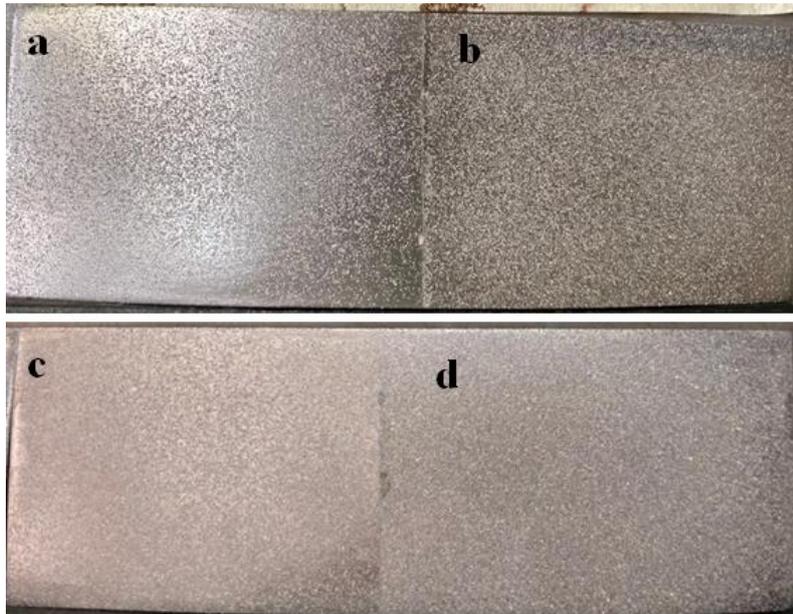


Figura 76. Placas de acero 316L sand-blasting, a) por un minuto, b) dos minutos, c) 3 minutos y, d) 4 minutos.

La *figura 77* muestra los gráficos obtenidos a través del rugosímetro Mitutoyo SJ-301 bajo la norma JIS2001 [21] en un área de 4 mm lineales, por secciones de 0.8mm 5 veces, a partir de estas se puede obtener distintos parámetros de rugosidad como la rugosidad promedio, es el valor medio aritmético de todos los valores del perfil de rugosidad.



Figura 77. Gráficos de rugosidad VS longitud 0.8X5 (x, y) para diferentes tiempos de sand-blasting a) un minuto, b) dos minutos, c) 3 minutos y d) 4 minutos

En la *tabla 17* se presenta los valores de rugosidad promedio se observa que para el tiempo de un minuto se obtuvo la menor rugosidad promedio de 3 Ra, mientras que con el tiempo de 4 minutos se alcanzó la rugosidad máxima con un valor de 5 Ra; se ve que para el tiempo de dos minutos la rugosidad fue mayor a la obtenida con 3 minutos, esto debido a la formación de crestas y valles, ya que después de cierto tiempo las crestas disminuyen, para después formar nuevas cada vez más grandes.

Tabla 17. Valores promedio de rugosidad.

Tiempo (min)	Ra (μm)
1	3.65
2	4.52
3	3.69
4	5.09

En la *figura 78* se muestran las placas después de la limpieza de líquidos penetrantes de contraste de color, en la *figura 78a* con tiempo de abrasión con la granalla de un

minuto se observa que se obtuvo una buena limpieza, para el tiempo de 4 minutos (*figura 78d*) se tiene mayor remanente del líquido penetrante esto debido a que es la superficie que presenta la mayor rugosidad promedio ($5.09 \mu\text{m}$); para la *figura 78b* con tiempo de abrasión con granalla de dos minutos, se observa la superficie más limpia que la de 3 minutos (*figura 78c*) a pesar de lo que indica la *tabla 13* donde se esperaba que la mayor limpieza de la superficie fuera sobre la placa con abrasión de 3 min.

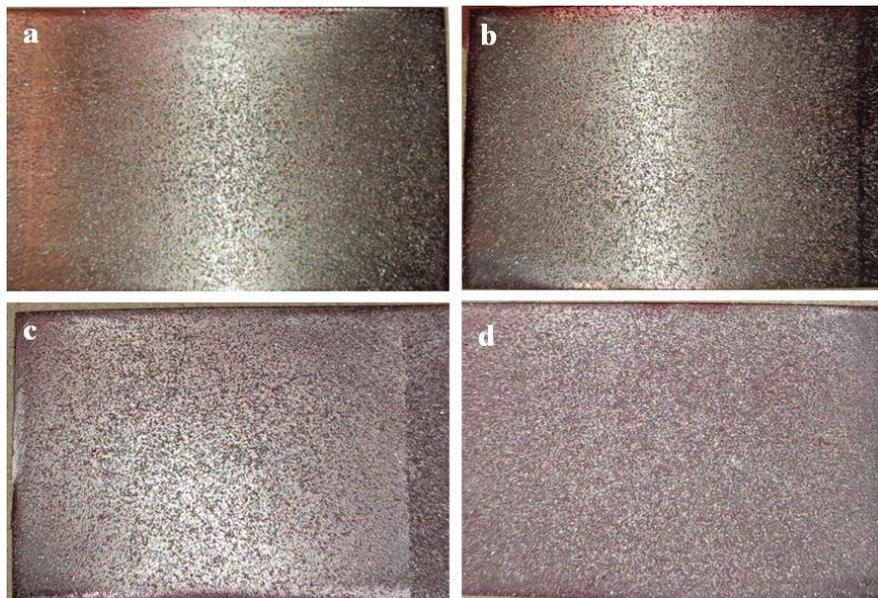


Figura 78. Limpieza de líquidos penetrantes coloreados sobre placas con sand-blasting, a) por un minuto, b) por dos minutos, c) por 3 minutos y d) por 4 minutos.

Con el uso penetrantes fluorescentes sobre las superficies rugosas ilustrado en la *figura 79a* donde se generó la mejor limpieza debido a que tiene la menor rugosidad ($3.65\mu\text{m}$), en las superficies con un tiempo de abrasión de 2 y 3 minutos (*figura 79b* y *79c* respectivamente) no se aprecia mucha diferencia sobre la limpieza del penetrante, así mismo la superficie con mayor rugosidad ($5.09 \mu\text{m}$) se consiguió la peor limpieza (*figura 79d*) esto ya que tiene la mayor superficie de anclaje donde se quede el líquido.

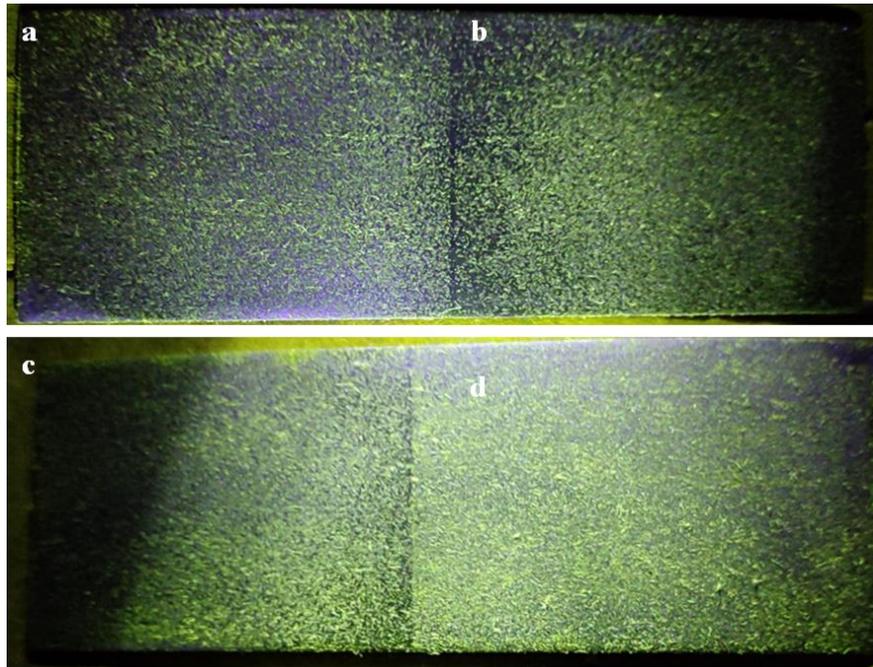


Figura 79. Limpieza de líquidos penetrantes fluorescentes sobre placas de sand-blasting, a) por un minuto, b) por dos minutos, c) por 3 minutos y d) por 4 minutos.

A mayor rugosidad en las superficies tendrá un menor lavado del penetrante tanto coloreado como fluorescente después de un tiempo de penetración en los defectos, así mismo para penetrantes fluorescente al ser de mayor sensibilidad con respecto al coloreado, deja mayor líquido remanente sobre la superficie. Se debe tener en cuenta que, si el penetrante se elimina con demasiada facilidad, causará eliminarlo también de las discontinuidades, lo que reduce la sensibilidad de detección de la discontinuidad, sobre todo para superficies o defectos poco profundos.

Los bloques patrón con defectos generados conocidos se hicieron por duplicado por lo que, para llevar una cuantificación y reproducibilidad de estos, requiere hacerse por triplicado para controlar la capacidad de visualización del penetrante.

El uso correcto de los paneles de prueba tipo II permite a los usuarios monitorear la prueba de penetración de acuerdo con el estándar teórico, lo que garantiza un alto rendimiento en la aplicación.

8. CONCLUSIONES

- De acuerdo a las gráficas esfuerzo deformación el recubrimiento que influye en mejorar las propiedades mecánicas es el bloque patrón con un tiempo de deposición de 5 min en ambos materiales con un UTS. De 580 MPa en latón y 416.5 MPa en acero.
- A una deformación del 75% del UTS en bloques patrón de latón son parcialmente visibles las grietas para el tiempo de deposición de 5 min, mientras que para el tiempo de 7 min las grietas ya son visibles con líquidos penetrantes fluorescentes
- La sensibilidad de los líquidos penetrantes fluorescentes es mayor que los líquidos penetrantes coloreados al detectar discontinuidades finas de 263.400µm, 248.428µm y 250.361 µm.
- El acabado superficial generado con menor rugosidad 3.65 µm, genera la mejor remoción de un penetrante durante el lavado/limpieza en comparación de la rugosidad 5.09 µm

9. ANEXOS

9.1 Anexo I. Cálculos para los baños electrolíticos

- Cálculos para baño de Ni

Dimensiones de la placa de latón: 55 mm x 120 mm x 2 mm.

$$\text{Área: } 55 \text{ mm} * 120 \text{ mm} * 2 \text{ mm} = 13200 \text{ mm}^2 = 1.32 \text{ dm}^2$$

Intensidad de corriente requerida de la celda con la densidad de corriente usada

$$I = A * i = 1.32 \text{ dm}^2 * 2 \text{ A/dm}^2 = 2.64 \text{ A}$$

Dimensiones de la placa de acero 316L: 35 mm x 100 mm x 2 mm.

$$\text{Área: } 35 \text{ mm} * 100 \text{ mm} * 2 \text{ mm} = 7000 \text{ mm}^2 = 0.70 \text{ dm}^2$$

Intensidad de corriente requerida de la celda con la densidad de corriente usada

$$I = A * i = 0.7 \text{ dm}^2 * 2.5 \frac{\text{A}}{\text{dm}^2} = 1.75 \text{ A}$$

- Cálculos para baño de Cr

Dimensiones de la placa de latón: 55 mm x 120 mm x 2 mm.

$$\text{Área: } 55 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} = 13200 \text{ mm}^2 = 1.32 \text{ dm}^2$$

Intensidad de corriente requerida de la celda con la densidad de corriente usada

$$I = A * i = 1.32 \text{ dm}^2 * 4.2 \text{ A/dm}^2 = 5.6 \text{ A}$$

Dimensiones de la placa de acero 316L: 35 mm x 100 mm x 2 mm.

$$\text{Área: } 35 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} = 7000 \text{ mm}^2 = 0.70 \text{ dm}^2$$

Intensidad de corriente requerida de la celda con la densidad de corriente usada

$$I = A * i = 0.7 \text{ dm}^2 * 5 \text{ A/dm}^2 = 3.5 \text{ A}$$

9.2 Anexo II. . Gráficos de rugosidad VS longitud 0.8X5

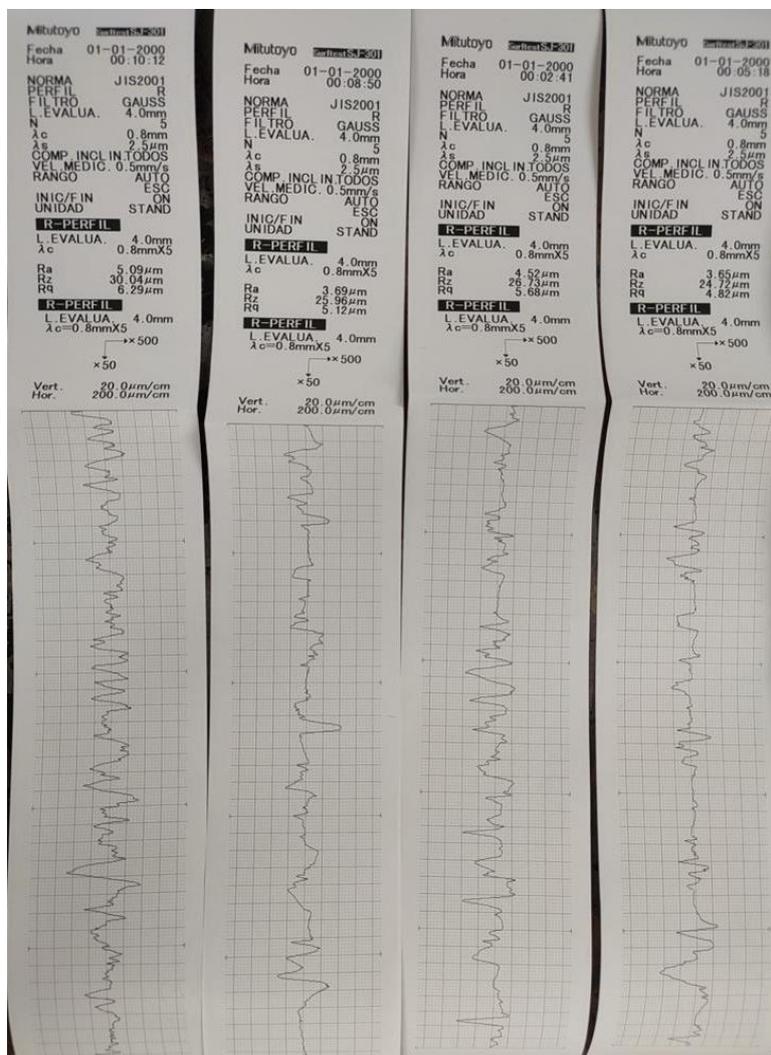


Figura 80. Gráficos de rugosidad VS longitud 0.8X5 para diferentes tiempos de sand-blasting

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Técnica de END por líquidos penetrantes”. Consultado: el 7 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Bpku1KfmGGkJ:https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/A0006/descargar.php%3Fsecc%3D0%26id%3DA0006%26id_inc%3D50088+&cd=16&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx
- [2] “ciencias_t8.3_liq_penetrantes.pdf”. Consultado: el 7 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/ciencias_t8.3_liq_penetrantes.pdf
- [3] “ASTM E 165-18. ‘Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination’”.
- [4] “Líquidos penetrantes: todo lo que tienes que saber sobre esta prueba”, *Asesoría y Equipos de Inspección Sa de CV*, el 9 de diciembre de 2019. <https://www.aeisa.com.mx/liquidos-penetrantes-todo-lo-que-tienes-que-saber-sobre-esta-prueba-no-destructiva/> (consultado el 7 de mayo de 2022).
- [5] hmong.wiki, “Sustrato (ciencia de materiales) RevestimientosyVer también”. [https://hmong.es/wiki/Substrate_\(materials_science\)](https://hmong.es/wiki/Substrate_(materials_science)) (consultado el 28 de octubre de 2022).
- [6] “Conceptos básicos de la ciencia de la superficie | La ciencia de la adhesión | 3M España”. https://www.3m.com.es/3M/es_ES/union-y-montaje/formacion/ciencia-de-la-adhesion/conceptos-basicos-de-la-ciencia-de-la-superficie/ (consultado el 28 de octubre de 2022).
- [7] “5 Tips para el cuidado de tus Bloques Patrón”. <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/5-tips-para-el-cuidado-de-tus-bloques-patron> (consultado el 28 de octubre de 2022).
- [8] “Bloque JIS Z2343 G-47 tipo 1 para tintas penetrantes – Mess Medición”. <https://messmedicion.com.ar/productos/tintas-y-particulas/tintaspentrantes-patrones-bloques/bloque-de-prueba-de-referencia-jis-z2343/> (consultado el 27 de octubre de 2022).
- [9] “Ni-Cr test panels”, *FORCE Ttechnology NDT Shop*. <https://ndtproducts.forcetechnology.com/product/ni-cr-test-panels/> (consultado el 28 de octubre de 2022).
- [10] “Latón | Densidad, resistencia, dureza, punto de fusión”, *Material Properties*, el 15 de junio de 2021. <https://material-properties.org/es/laton-densidad-resistencia-dureza-punto-de-fusion/> (consultado el 9 de enero de 2023).
- [11] “Kinzel et al. - Monitoring of Penetration System Performance due t.pdf”. Consultado: el 28 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/fr1c2.pdf>
- [12] “¿Qué es el acero inoxidable? Definición | Propiedades materiales”, *Material Properties*, el 28 de septiembre de 2021. <https://material-properties.org/es/que-es-el-acero-inoxidable-definicion/> (consultado el 9 de enero de 2023).
- [13] “Niquelado”, *MIPSA | Metales Industriales de Puebla S.A. de C.V.* <https://www.mipsa.com.mx/procesos/acabados/niquelado/> (consultado el 11 de febrero de 2022).
- [14] L. A. M. Mozo y M. E. Milla, “CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE RECUBRIMIENTOS METÁLICOS UTILIZADOS EN LA EMPRESA M.D.F CROMATODO S.A DE C.V.”, PARA OPTAR TÍTULO DE: INGERIERO MECÁNICO, UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, 2006.

- [15] E. A. P. Bonilla y M. A. S. Rodríguez, “PLANTA DE CROMADO”, TESINA PARA OPTAR TÍTULO DE: INGENIERO QUÍMICO, UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL, GUAYAQUIL, ECUADOR, 2011.
- [16] “Hernández y Gallego - Deposición electrolítica de Níquel.pdf”. Consultado: el 11 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://icts-yebes.oan.es/reports/doc/IT-CDT-2015-8.pdf>
- [17] “Cromado”, *MIPSA | Metales Industriales de Puebla S.A. de C.V.* <https://www.mipsa.com.mx/procesos/acabados/cromado/> (consultado el 11 de febrero de 2022).
- [18] “Cromado y otros acabados y acondicionados de metales en Zaragoza”, *Electro Níquel Forcán. Acabado y restauración de metales en Zaragoza.* <https://electroniquelforcán.com/cromado-de-metales/> (consultado el 11 de febrero de 2022).
- [19] “INEN 954. Recubrimientos electrolíticos de Ni y Ni+Cr sobre acero fundición Zn, Cu, Al o Ni, así como aleaciones de Zn, Cu o Al.pdf”. Consultado: el 10 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/954.pdf>
- [20] “QUE ES EL SANDBLASTING SOBRE METAL?”, *Gondoba*, el 11 de mayo de 2019. <https://gondoba.com/2019/05/11/que-es-el-sandblasting-sobre-metal/> (consultado el 21 de mayo de 2022).
- [21] “RUGOSIDAD SUPERFICIAL.pdf”. Consultado: el 27 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>
- [22] “EFECTO FRL GRANALLADO EN LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL Ti c.p.” Consultado: el 27 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6044/06Cjab06de12.pdf?sequence=6>
- [23] “Medidores de Rugosidad - Neurtek”. <https://www.neurtek.com/es/pintura-recubrimientos/tratamiento-superficies/rugosidad> (consultado el 27 de octubre de 2022).
- [24] mlanas, “Perfil de Superficie y Rugosidad. Comparación de métodos de medición. — Neurtek”. <https://www.neurtek.com/es/academia/articulos-tecnicos/pinturas-y-recubrimientos/perfil-de-superficie-y-rugosidad-comparacion-de-metodos-de-medicion> (consultado el 4 de noviembre de 2022).
- [25] “Rugosímetro - ¿Qué es, cómo funciona y para qué sirve? 🇧🇷”, *Materiales de Laboratorio*, el 15 de julio de 2019. <https://materialeslaboratorio.com/rugosimetro/> (consultado el 4 de noviembre de 2022).
- [26] F. Zapata, “Ensayo de tensión: cómo se realiza, propiedades, ejemplos”, *Lifeder*, el 25 de mayo de 2020. <https://www.lifeder.com/ensayo-de-tension/> (consultado el 14 de mayo de 2022).
- [27] “Ensayo De Tensión | Aceros Levinson”, *Aceros Levinson | Aceros | Plásticos | Metales*, el 9 de julio de 2020. <https://www.aceroslevinson.com/2020/07/ensayo-de-tension/> (consultado el 14 de mayo de 2022).
- [28] M. Becerra-Rodríguez, V. J. Aguilar-Díaz, J. Bernardino-González, y F. Santana-Ramírez, “Tratamientos térmicos”, *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, vol. 8, núm. 15, Art. núm. 15, ene. 2021, doi: 10.29057/estr.v8i15.6397.
- [29] “Dureza metalúrgica.pdf”. Consultado: el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en:

https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/8178/mod_resource/content/1/1%20Teoria.pdf

- [30] “Ensayo de dureza Vickers: Vickers, ISO 6507, ASTM E92, ASTM E384”, *Ensayo de dureza Vickers: Vickers, ISO 6507, ASTM E92, ASTM E384*. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-vickers-iso-6507/> (consultado el 21 de mayo de 2022).
- [31] “¿Qué es un Espectrómetro de Emisión Óptica (OES) y por qué es importante para la industria?”, *Espectrometros*, el 5 de octubre de 2020. <https://espectrometria.com.mx/que-es-un-espectrometro-de-emision-optica-oes-y-por-que-es-importante-para-la-industria/> (consultado el 27 de octubre de 2022).
- [32] “Microscopía Electrónica de Barrido”, *SERVICIOS CENTRALES DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN*. <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html> (consultado el 27 de octubre de 2022).
- [33] “Introducción al Medidor de Espesor por Ultrasonido”, *De Máquinas y Herramientas*. <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/medidor-de-espesor-por-ultrasonido> (consultado el 27 de octubre de 2022).
- [34] “ISO 3452-3. Non-destructive testing - Penetrant testing- Part 3: Reference test blocks”. Consultado: el 19 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sis.se/api/document/preview/916766/>
- [35] “ASTM B 36/B 36M. ‘Standard Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, And Rolled Bar’.”
- [36] “ASTM A 240/A 240M. ‘Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels’.”
- [37] “ASTM E 92-17. ‘Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials’.”
- [38] “ASTM E 18-22. ‘Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials’.”
- [39] “Cuáles son las propiedades del latón - Latón Cartridge - UNS C26000 - Definición | Propiedades materiales”, *Material Properties*, el 18 de agosto de 2021.
- [40] “ASTM B 19-20. ‘Standard Specification for Cartridge Brass Sheet, Strip, Plate, Bar, and Disks’.”
- [41] J. C. Farías Aguilar, “MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ESTUCHE DE LATÓN 70/30 EMPLEADO EN CARTUCHERÍA MILITAR.”, Tesis para obtener grado en: Maestro en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica, IPN, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, México D.F., 2011.
- [42] T. H. Fernández-Columbié, I. Rodríguez-González, D. Alcántara-Borges, A. Salazar-Preval, y A. Abad-Brocard, “Caracterización microestructural de uniones soldadas de acero AISI 316L en tuberías”, vol. 32, núm. Minería y Geología, pp. 60–75, 2016.