



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

FACULTAD MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ESTUDIO DE LA CORROSIVIDAD DEL JUGO DE CAÑA EN
LOS PUNTOS MÁS CRÍTICOS DEL PROCESO DE
ELABORACIÓN DE AZÚCAR EN EL MICRO INGENIO
ASPROCA”**

WILLIAM MIGUEL BENAVIDES SEGURA

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA –ECUADOR

2011

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

CONSEJO DIRECTIVO

Diciembre, 09 del 2011

Fecha

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

WILLIAM MIGUEL BENAVIDES SEGURA

Titulada:

**“ESTUDIO DE LA CORROSIVIDAD DEL JUGO DE CAÑA EN LOS PUNTOS
MÁS CRÍTICOS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE AZÚCAR EN EL
MICRO INGENIO ASPROCA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

f) Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO FACULTAD MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

DIRECTOR DE TESIS

f) Ing. Edgar Ortíz R

f) Ing. Raúl Cabrera F.
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: WILLIAM MIGUEL BENAVIDES SEGURA

TÍTULO DE LA TESIS:

“ESTUDIO DE LA CORROSIVIDAD DEL JUGO DE CAÑA EN LOS PUNTOS MÁS CRÍTICOS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE AZÚCAR EN EL MICRO INGENIO ASPROCA”

Fecha de Exanimación: Diciembre 09 del 2011

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

| COMITÉ DE EXAMINACIÓN | APRUEBA | NO APRUEBA | FIRMA |
|--|---------|---------------|-------|
| ING. Eduardo Vásquez (Presidente Tribunal Defensa) | | | |
| ING. Edgar Ortiz. (Director de Tesis) | | | |
| ING. Raúl Cabrera F.(Asesor) | | | |

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

f) Presidente del Tribunal

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos: teórico - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

f) William Miguel Benavides Segura

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme el regalo más hermoso, la vida, agradezco a mis padres Miguel Benavides e Inés Segura, por todo el sacrificio y esfuerzo que hicieron para educarme. Agradezco a mis hermanos Lizeth y Cristhian. De igual manera a todos mis familiares. Agradezco al Ing. Edgar Ortiz Ramos M. Sc. como Director por toda su ayuda, consejos y su apoyo incondicional en los momentos más difíciles que tuve que enfrentar en el desarrollo de este proyecto, agradezco al Ing. Raúl Cabrera Funez M. Sc. asesor por todas sus acertadas sugerencias. A la Dra. Gina Álvarez por su gran ayuda en la culminación de este proyecto. Al Ing. Julián Peña P.Hd. Docente ESPOL. Quien supo guiarme y encaminarme en la ejecución de este proyecto. Agradezco a todos mis amigos por su apoyo incondicional.

A todos mil gracias.

W. M. B. S.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres Miguel Benavides e Inés Segura, a mis hermanos Lizeth y Cristhian, a mi familia, a mis amigos y a Saira por su amor y apoyo incondicional a lo largo de estos años, a todos los que depositaron en mi su confianza a lo largo de este tiempo y a todos quienes me brindaron su apoyo y ayuda desinteresada en la culminación de este proyecto.

W.M.B.S.

TABLA DE CONTENIDOS

| <u>CAPÍTULO</u> | <u>PÁGINA</u> |
|---|---------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 23 |
| 1.1. Antecedentes..... | 23 |
| 1.2. Justificación..... | 24 |
| 1.3. Objetivos..... | 24 |
| 1.3.1. General..... | 24 |
| 1.3.2. Específicos..... | 24 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 25 |
| 2.1. Definición de corrosión..... | 25 |
| 2.2. Corrosión en materiales metálicos..... | 25 |
| 2.3. Principios de la corrosión..... | 25 |
| 2.4. Mecanismos básicos de la corrosión..... | 26 |
| 2.4.1. Corrosión en ácidos | 26 |
| 2.4.2. Corrosión en soluciones neutras | 27 |
| 2.5. Diferencia de potencial eléctrico..... | 27 |
| 2.6. Diagrama de pourbaix..... | 28 |
| 2.7. Generalidades de la caña de azúcar..... | 30 |
| 2.7.1. Caña de azúcar..... | 30 |
| 2.7.2. Composición del jugo de caña..... | 31 |
| 2.7.3. Conductividad..... | 33 |
| 2.7.4. Conductividad en medios líquidos..... | 33 |
| 2.8. Estudio de la cachaza y de la vinaza..... | 34 |
| 2.8.1. Cachaza..... | 34 |
| 2.8.2. Proceso de la obtención de la cachaza..... | 34 |
| 2.8.3. Vinaza..... | 35 |
| 2.9. Determinación de ph..... | 36 |
| 2.10. Variables físicas del agua..... | 38 |

| | |
|---|----|
| 2.10.1. Temperatura del agua..... | 38 |
| 2.10.2. Presión del sistema..... | 38 |
| 2.10.3. Velocidad del agua..... | 38 |
| 2.11. Análisis químico de agua utilizado en el proceso de producción..... | 39 |
| 2.11.1. Determinación del ph..... | 39 |
| 2.11.2. Dureza del agua..... | 39 |
| 2.11.3. Conductividad del agua..... | 40 |
| 2.11.4. Cloruros..... | 40 |
| 2.11.5. Gases disueltos..... | 40 |
| | |
| 3. AMBIENTE CORROSIVO..... | 42 |
| 3.1. Tipos de corrosión..... | 42 |
| 3.2. Según el medio..... | 43 |
| 3.2.1. Corrosión química..... | 43 |
| 3.2.2. Corrosión bioquímica..... | 44 |
| 3.2.2.1. Corrosión por biológica en sistemas de enfriamiento..... | 45 |
| 3.2.2.2. Corrosión biológica activa..... | 45 |
| 3.2.2.3. Lugares..... | 45 |
| 3.2.2.4. Identificación..... | 46 |
| 3.2.2.5. Sulfatorreductoras..... | 46 |
| 3.2.2.6. Identificación de problemas microbiológicos..... | 47 |
| 3.2.2.7. Control de microorganismos..... | 48 |
| 3.2.2.8. Medidas preventivas..... | 49 |
| 3.2.3. Corrosión electroquímica..... | 49 |
| 3.2.3.1. Polarización..... | 49 |
| 3.2.4. Corrosión galvánica..... | 50 |
| 3.3. Según la forma..... | 51 |
| 3.3.1. Corrosión uniforme..... | 51 |
| 3.3.2. Corrosión localizada..... | 52 |
| 3.3.2.1. Corrosión por pitting..... | 52 |
| 3.3.2.2. Corrosión bajo tensión..... | 54 |
| 3.4. Otras formas de corrosión..... | 55 |

| | |
|---|----|
| 3.4.1. Corrosión por cavitación. | 55 |
| 3.4.2. Corrosión por erosión. | 56 |
| 3.4.3. Corrosión por fricción. | 57 |
| 3.5. Ubicación geográfica, altitud, humedad. | 57 |
| 3.5.1. Ubicación geográfica. | 57 |
| 3.5.2. Clima. | 57 |
| 3.6. Ensayos de corrosión. | 59 |
| 3.6.1. Ensayos de campo. | 60 |
| 3.6.1.1. En la atmósfera. | 60 |
| 3.6.1.2. En el agua. | 61 |
| 3.6.1.3. En el suelo. | 61 |
| 3.6.2. Procedimiento de ensayo. | 61 |
| 3.6.2.1. Selección de materiales y probetas. | 61 |
| 3.6.2.2. Preparación de las probetas. | 61 |
| 3.6.2.3. Selección de medio corrosivo. | 62 |
| 3.6.2.4. Ejecución del ensayo. | 62 |
| 3.6.3. Evaluación de los resultados de los ensayos de corrosión. | 62 |
| 3.6.3.1. Método de estimación visual. | 62 |
| 3.6.3.2. Métodos gravimétricos. | 63 |
| 3.6.4. Valorización de efectos sobre el medio. | 63 |
| 3.6.4.1. Métodos analíticos. | 63 |
| 3.6.4.2. Medición electroquímica. | 63 |
| 3.6.4.2.1. Medición de potencial. | 63 |
| 3.7. Rata de corrosión. | 63 |
| 3.8. Formula de la rata de corrosión o velocidad de penetración (c). | 65 |
| 3.9. Causas de la oxidación y la corrosión. | 65 |
| 3.9.1. Oxidación del hierro. | 65 |
| 3.9.2. Tipos de oxidación. | 66 |
| 3.9.2.1. Oxidación lenta. | 66 |
| 3.9.2.2. Oxidación rápida. | 66 |
| 3.9.3. Los factores de la corrosión. | 66 |
| 3.9.3.1. Concentración de reactivo. | 67 |

| | |
|--|----|
| 3.9.3.2. pH del medio..... | 67 |
| 3.9.3.3. Estado de superficie..... | 68 |
| 3.9.4. Métodos de protección contra la corrosión y oxidación..... | 68 |
| 3.9.4.1. Protección contra la corrosión..... | 68 |
| 3.9.4.2. Selección de materiales..... | 68 |
| 3.9.4.3. Recubrimientos..... | 68 |
| 3.9.4.4. Diseño..... | 69 |
| 3.9.4.5. Alteración del entorno..... | 69 |
| 3.9.4.6. Protección catódica..... | 70 |
| 3.9.4.7. Protección anódica..... | 70 |
| | |
| 4. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS..... | 71 |
| 4.1. Metales y sus aleaciones..... | 71 |
| 4.2. Clasificación de los aceros..... | 72 |
| 4.2.1. Clasificación de los aceros atendiendo a su procedimiento de fabricación..... | 72 |
| 4.2.2. Clasificación de los aceros atendiendo el porcentaje de carbono..... | 72 |
| 4.2.3. Clasificación de los aceros atendiendo a su constitución..... | 73 |
| 4.3. Aceros inoxidables..... | 74 |
| 4.3.1. Aceros inoxidables ferríticos..... | 74 |
| 4.3.2. Aceros inoxidables austeníticos..... | 75 |
| 4.3.3. Aceros inoxidables martensíticos..... | 75 |
| 4.3.4. Aceros inoxidables dúplex..... | 76 |
| 4.3.5. Aceros inoxidables endurecidos por precipitación..... | 77 |
| 4.4. Clases de tratamientos..... | 79 |
| 4.4.1. Tratamientos..... | 79 |
| 4.4.1.1. Normalizado..... | 79 |
| 4.4.1.2. Recocido total..... | 80 |
| 4.4.1.3. Recocido de esferoidización..... | 81 |
| 4.4.1.4. Recocido para eliminación de esfuerzos..... | 81 |
| 4.4.1.5. Recocido de procesos..... | 81 |
| 4.4.1.6. Temple..... | 81 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.1.6.1. Temple estructural o martensítico | 82 |
| 4.4.1.6.2. Temple de precipitación | 82 |
| 4.4.1.7. Revenido | 82 |
| 4.4.2. Tratamientos superficiales | 83 |
| 4.5. Recubrimiento metálico | 84 |
| 4.5.1. Galvanizado | 84 |
| 4.5.1.1. Propiedades | 85 |
| 4.5.1.2. Resistencia a la abrasión | 85 |
| 4.5.1.3. Resistencia a la abrasión | 85 |
| 4.5.1.4. Corrosión atmosférica | 86 |
| 4.5.1.5. Corrosión en agua dulce | 86 |
| 4.5.1.6. Corrosión en agua de mar | 86 |
| 4.5.1.7. Ventajas | 86 |
| 4.6. Alternativas | 87 |
| 4.6.1. Aceros al carbono y de baja aleación termotratables | 87 |
| 4.6.2. Aceros inoxidables | 88 |
| | |
| 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 90 |
| 5.1. Análisis químico del agua | 90 |
| 5.1.1. Índice de Langelier | 91 |
| 5.1.2. Índice de Ryznar | 92 |
| 5.1.3. pH de saturación (pHs) | 92 |
| 5.2. Tratamiento de agua para calderas | 94 |
| 5.2.1. Fuentes de agua | 95 |
| 5.2.2. Requerimientos del agua alimentación y caldera | 95 |
| 5.2.3. Tratamiento con productos químicos | 96 |
| 5.3. Análisis metalográfico de los cupones | 97 |
| 5.3.1. Análisis de inclusiones | 97 |
| 5.3.2. Tamaño de grano de un acero AISI 1015 | 102 |
| 5.3.3. tamaño de grano de un acero AISI 304 | 81 |
| 5.3.4. Determinación de la dureza brinell | 105 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.5. Cálculo del carbono equivalente..... | 86 |
| 5.4. Tasa de corrosión de los materiales | 112 |
| 5.4.1. Preparación de los cupones..... | 112 |
| 5.4.2. Tipos de cupones | 113 |
| 5.4.3. Selección del portacupones | 113 |
| 5.4.4. Limpieza química de los cupones..... | 115 |
| 5.4.5. Determinación de la velocidad de corrosión | 116 |
| 5.4.6. Densidad del material | 116 |
| 5.4.7. Datos de la pérdida de peso y la velocidad de corrosión | 116 |
| 5.4.8. Velocidades de corrosión..... | 119 |
| 5.4.9. Rata de corrosión de los aceros. | 124 |
| 5.5. Análisis de herrumbres. | 128 |
| 5.5.1. Análisis químico de herrumbres | 129 |
| 5.6. Criterios de selección..... | 130 |
| 5.7. Descripción del proceso de la elaboración del azúcar o panela granulada.... | 130 |
| 5.7.1. Cosecha y transporte..... | 130 |
| 5.7.2. Pesaje y almacenamiento..... | 130 |
| 5.7.3. Preparación de la caña | 130 |
| 5.7.4. Extracción del jugo | 131 |
| 5.7.5. Clarificación | 131 |
| 5.7.6. Evaporación | 131 |
| 5.7.7. Clarificación de meladura..... | 131 |
| 5.7.8. Cristalización y cocimiento | 132 |
| 5.7.9. Centrifugación | 132 |
| 5.7.10. Secado..... | 132 |
| 5.7.11. Envase..... | 132 |
| 5.8. Selección de materiales..... | 132 |
| 5.8.1. Selección de materiales para los tachos de almacenamiento..... | 132 |
| 5.8.2. Selección de tuberías | 134 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 135 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BIBLIOGRAFÍA.

LINKOGRAFÍA.

ANEXOS.

LISTA DE TABLAS

| <u>TABLA</u> | <u>PÁGINA</u> |
|--|---------------|
| 2.1. SERIE ELECTROQUÍMICA DE LOS METALES | 6 |
| 2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AZÚCAR ENTERA | 32 |
| 2.3. COMPOSICIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR | 33 |
| 2.4. ANÁLISIS QUÍMICO DEL JUGO DE CAÑA..... | 34 |
| 2.5. COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA DEL JUGO DE CAÑA | 35 |
| 2.6. CARACTERÍSTICAS DE LAS VINAZAS OBTENIDAS EN COLOMBIA | 36 |
| 2.7. DETERMINACIÓN DEL PH DEL JUGO DE CAÑA..... | 37 |
| 2.8. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO | 38 |
| 2.9. ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA. | 41 |
| 3.1. SITIOS Y DAÑOS MÁS COMUNES DE LOS MICROORGANISMOS | 44 |
| 3.2. TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AMBIENTE. | 58 |
| 3.3. TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AMBIENTE. | 58 |
| 3.4. TEMPERATURA DEL SUELO. | 59 |
| 3.5. FACTORES DE CORROSIÓN | 67 |
| 4.1. DISTINTOS TIPOS DE ACEROS | 77 |
| 4.2. DISTINTOS TIPOS DE ACERO ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN | 78 |
| 5.1. ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA. | 91 |
| 5.2. COMPARACIÓN DE LOS ÍNDICES DE SATURACIÓN | 92 |
| 5.3. RESULTADOS OBTENIDOS..... | 94 |
| 5.4. REQUERIMIENTOS DE AGUA DE ALIMENTACIÓN | 95 |
| 5.5. REQUERIMIENTOS DE AGUA DE CALDERA | 96 |
| 5.6. INCLUSIONES DE UN ACERO DE BAJO CARBONO AISI 1015..... | 98 |
| 5.7. INCLUSIONES DE UN ACERO INOXIDABLE AISI 304..... | 78 |
| 5.8. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 1015. | 109 |
| 5.9. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS | 110 |
| 5.10. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304..... | 111 |
| 5.11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACERO INOXIDABLES AUSTENÍTICOS | 112 |
| 5.12. SOLUCIONES PARA DECAPADO | 115 |

| | |
|--|-----|
| 5.13. DENSIDAD DE LOS ACEROS | 116 |
| 5.14. PÉRDIDA DE PESO Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO AISI 1015..... | 117 |
| 5.15. PÉRDIDA DE PESO Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO AISI 304. | 118 |
| 5.16. ANÁLISIS QUÍMICO DE HERRUMBRES I..... | 129 |
| 5.17. ANÁLISIS QUÍMICO DE HERRUMBRES II..... | 129 |

LISTA DE FIGURAS

| <u>FIGURA</u> | <u>PÁGINA</u> |
|--|----------------------|
| 2.1. Corrosión del hierro en presencia del oxígeno | 26 |
| 2.2. Diagrama de Pourbaix | 30 |
| 2.3. Caña de azúcar | 31 |
| 2.4. Obtención de la cachaza | 35 |
| 2.5. Aspecto de la cachaza | 36 |
| 2.6. Obtención del jugo de caña..... | 37 |
| 3.1. Principales formas de corrosión reagrupadas por su facilidad de reconocimiento | 43 |
| 3.2. Oxidación del hierro | 43 |
| 3.3. Propagación lineal | 44 |
| 3.4. Tubo de aluminio picado por sulfato reductoras | 47 |
| 3.5. Picadura de un tubo por sulfato reductoras..... | 25 |
| 3.6. Picaduras de una placa de AISI 316 | 47 |
| 3.7. Corrosión galvánica | 50 |
| 3.7. Motivos de condensación del agua | 52 |
| 3.8. Corrosión uniforme en tuberías | 52 |
| 3.9. Diferentes formas de corrosión por picadura | 54 |
| 3.10. Corrosión por cavitación | 55 |
| 3.11. Daños de corrosión por cavitación | 56 |
| 3.12. Corrosión por erosión | 57 |
| 4.1. Diagrama hierro carbono | 73 |
| 4.3. Intervalo de recocido, normalización y endurecimiento para aceros al carbono .. | 79 |
| 5.1. Fotografías de inclusiones sección longitudinal a 100x. | 98 |
| 5.2. Inclusiones tipo D 2 ½ óxidos globulares según ASTM E 45-97..... | 99 |
| 5.3. Inclusiones tipo D 2 óxidos globulares según ASTM E 45-97..... | 99 |
| 5.4. Inclusiones tipo A ½ sulfuros según ASTM E 45-97..... | 99 |
| 5.5. Fotografías de inclusiones sección longitudinal a 100x. | 100 |
| 5.6. Inclusiones tipo D 3 óxidos globulares según ASTM E 45-97..... | 101 |

| | |
|--|-----|
| 5.7. Inclusiones tipo D 5 óxidos globulares según ASTM E 45-97..... | 101 |
| 5.8. Acero AISI 1015 atacado químicamente con nital al 4% a 500x..... | 102 |
| 5.9. Acero AISI 304 recocido y atacado químicamente con ácido oxálico a 500x. | 104 |
| 5.10. Microestructura del acero AISI 1015 tomada a 100 x..... | 110 |
| 5.11. Microestructura del acero inoxidable AISI 304 tomadas a 500x..... | 111 |
| 5.12. Dimensiones del cupón..... | 113 |
| 5.13. Instalación de los cupones | 114 |
| 5.14. Instalación de los cupones | 114 |
| 5.15. Balanza analítica | 115 |
| 5.16. Velocidad de corrosión vs tiempo | 119 |
| 5.17. Diferencial de peso AISI 1015 en jugo de caña..... | 120 |
| 5.18. Diferencial de peso AISI 1015 en agua..... | 121 |
| 5.19. Diferencial de peso AISI 1015 en la atmósfera..... | 121 |
| 5.20. Diferencial de peso AISI 304 en jugo..... | 122 |
| 5.21. Diferencial de peso AISI 304 en agua..... | 123 |
| 5.22. Diferencial de peso AISI 304 en la atmósfera..... | 123 |
| 5.23. Velocidad de corrosión AISI 1015 en jugo..... | 124 |
| 5.24. Velocidad de corrosión AISI 1015 en agua..... | 125 |
| 5.25. Velocidad de corrosión AISI 1015 en la atmósfera..... | 125 |
| 5.26. Velocidad de corrosión AISI 304 en jugo..... | 126 |
| 5.29. Trituración de las escorias | 128 |

LISTA DE ABREVIACIONES

| | |
|---------|---|
| AISI | American National Standards Institute (Instituto Nacional de Normalización Estadounidense) |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) |
| ASPROCA | Asociación de Productores de Caña |
| ASTM | American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). |
| AWS | American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura) |
| C | Rata de corrosión |
| CE | Carbono Equivalente |
| HR | Humedad Relativa |
| ISL | Índice de Langelier |
| IR | Índice de Ryznar |
| IP | Índice de Puckorius |
| NACE | National Association of Corrosion Engineers (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión). |
| OSHA | Occupational Safety and Health Administration (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional) |
| pH | Potencial de Hidrógeno |
| pHS | pH de saturación |
| PEMEX | Petróleos Mexicanos |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Definición | |
|-----------------|---------------------------|-------------------|
| Unidades | | |
| C | Rata de corrosión | mpy |
| W | Perdida de peso | g |
| D | Densidad del material | g/cm ³ |
| A | Área | mm ² |
| t | tiempo | días |
| T | Temperatura | °C |
| HM | Humedad Relativa | % |
| E ° | Potencial Electrodo | V |
| TDS | Sólidos disueltos totales | mg/l |
| HB | Dureza Brinell | HB |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---------|---|
| ANEXO A | Análisis químico del jugo de caña. |
| ANEXO B | Análisis microbiológico del jugo de caña. |
| ANEXO C | Análisis químico del Agua. |
| ANEXO D | Análisis químico del acero AISI 1015. |
| ANEXO E | Análisis químico de escorias del Tacho de almacenamiento. |
| ANEXO F | Análisis químico de escorias del Tacho de clarificación. |

RESUMEN

Se ha realizado el Estudio de Corrosividad del Jugo de Caña en los Puntos más Críticos del Proceso de Elaboración de Azúcar en el Micro Ingenio ASPROCA-Chazo Juan-Bolívar, Determinando la Rata Corrosiva del Jugo de Caña, Agua y Atmósfera, con la finalidad de Seleccionar los Materiales adecuados para la Construcción de los nuevos Equipos que se Instalarán a Futuro.

Se realizó el Análisis de la Velocidad de Corrosión de los Aceros AISI 1015 y el AISI 304 mediante la Instalación de Cupones según las Normas PEMEX No 4.411.03. Se Realizó el Análisis Químico de Escorias de los Equipos Corroídos por el método de Difractometría y se Realizó el Análisis Químico del Agua tomando muestras del Agua de la localidad.

Con estos resultados se determino que la Rata de Corrosión de un Acero de bajo carbono AISI 1015 expuesto a los tres medios antes mencionados es Alta, la Rata de Corrosión de un Acero Inoxidable AISI 304 expuesto a los mismos medios es Mínima. El Análisis de Escorias realizado presento alto contenido de Óxido de Hierro y alto contenido de Óxido de Sílice. El Análisis Químico del Agua presento alta concentración de gases prevaleciendo el oxígeno disuelto en altas cantidades, provocando Corrosión en Tuberías y Corrosión en el Caldero.

Fue necesario recomendar la utilización de Acero inoxidable AISI 304 para la Fabricación de los Equipos de Almacenamiento y Clarificación del Jugo de Caña. Fue necesario recomendar la utilización de Tubería de Acero Inoxidable desde el área de Almacenamiento hasta el área de Clarificación del Jugo de Caña. En los procesos siguientes se recomienda utilizar Tubería de Acero Galvanizado. Fue necesario recomendar la adición de Secuestrantes de Oxígeno en la piscina de almacenamiento de Agua.

SUMMARY

The Corrosion Study of the Sugar Cane Juice has been carried out in the most critical points of the Sugar Cane Elaboration Process at the micro sugar mill ASPROCA-Chazo Juan - Bolivar, determining the corrosive rate of the Sugar Cane Juice, Water and Atmosphere, to select the adequate materials for the construction of the new equipment to be installed in the future. The corrosion velocity analysis of the steels AISI 1015 and the AISI 304 through the installation of coupons according to the Norms PEMEX N° 4.411.03, was carried out. The chemical analysis of the slag of the corroded equipment was performed through the diffractometry method and the water chemical analysis was also performed by taking samples from the place water. With these results, it was determined that the a low-carbon AISI 1015 steel corrosion rate exposed to three above-mentioned environments is high; the stainless steel AISI 304 corrosion rate exposed to the same environments is minimum. The slag analysis showed a high iron oxide content and a high silicon oxide content. The water chemical analysis presented a high gas concentration prevailing the solved oxygen in high quantities and provoking corrosion in piping and in boilers. It was necessary to recommend the use of the stainless steel AISI 304 for the manufacturing of the storage equipment and clarification of the sugar cane juice. It was necessary to recommend the use of stainless steel piping from the storage area up to the sugar cane clarification area. In the following processes, it is recommended to use galvanized steel piping. It was necessary to recommend the addition of oxygen kidnaper in the water storage pool.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes.

La comunidad Chazo Juan, se encuentra ubicada el cantón Guaranda, en la Provincia Bolívar el clima es subtropical y posee una temperatura que va desde los 18 a 26 °C, cuenta con un micro ingenio azucarero, la quesera, la embutidora, criaderos de cerdos, botiquín comunitario, artesanías de tagua, entre otras.

El micro ingenio como se encuentra instalado en un ambiente húmedo y trabajando principalmente con jugo de caña que por su alta acidez a altas temperaturas ha originado un efecto bastante agresivo del fluido que ha producido el deterioro prematuro de sus componentes ya que fueron construidos de acero común sin ningún tratamiento de protección anticorrosiva.

Al tener alta rata corrosiva desgaste y contaminación algunos de estos equipos (recipientes, tuberías, tachos) y al estar en contacto con el jugo de caña, agua sin tratamiento y ambiente húmedo se presenta el fenómeno corrosivo lo que da dificultades en la elaboración del azúcar lo cual puede generar problemas por incumplir las normas de salud OSHA y las de control de procesos de manufactura y de materiales, (AISI, ASME, ASTM).

La corrosión es el “cáncer” de los materiales metálicos que destruye recipientes, tuberías y equipos, causando grandes pérdidas económicas y humanas. Por lo tanto es la más importante preocupación en la industria, por cuanto es considerada la más significativa por los gastos y daños que genera en las instalaciones.

Consecuentemente es conveniente hacer un estudio del problema con la rata de corrosión en el ambiente y el medio; para posteriormente poder disminuir los daños que esto produce al equipo o a las instalaciones conformadas por recipientes, tuberías, tachos, caldero; de tal manera que se cumpla el control ambiental y la selección de los materiales para la reconstrucción de cada componente y su respectivo tratamiento superficial sea el más idóneo en función del desempeño en el proceso productivo y calidad del producto alimenticio.

1.2. Justificación.

Para la elaboración del presente trabajo se aplicará los conocimientos científicos y tecnológicos impartidos por las diferentes áreas de la escuela de Ingeniería Mecánica, y particularmente del área de Manufactura y Materiales.

El tema de tesis tiene como finalidad hacer un estudio de la rata corrosiva dado en los materiales e instalaciones, provocado por el ambiente, el agua, el jugo de caña que afecta a los dispositivos del micro ingenio ASPROCA. Con el fin de seleccionar los materiales y tratamientos superficiales y así prolongar la vida útil de los nuevos dispositivos que se instalarán a futuro, a fin de cumplir condiciones de calidad e higiene en la elaboración del azúcar y panela granulada.

Se fomentara el desarrollo tecnológico de la comunidad, sustituyendo la forma artesanal de producir panela con las mejores condiciones higiénicas a proceso tecnológicamente industrializado de refinamiento de azúcar y panela granulada cumpliendo condiciones de calidad e higiene, generando a la comunidad fuentes de empleo directa e indirectamente.

1.3. Objetivos.

1.3.1. General.

- Realizar el estudio de la corrosividad del jugo de caña en los puntos más críticos del proceso de elaboración de azúcar en el micro ingenio ASPROCA.

1.3.2. Específicos.

- Realizar un estudio de la rata corrosiva del jugo de caña, del agua y de la atmósfera en los equipos que se encuentren mayormente afectados por la alta tasa corrosiva.
- Realizar ensayos de corrosión de los materiales que están en contacto con el jugo de caña, el agua y la atmósfera.
- Seleccionar los materiales adecuados para tubería y recipientes de almacenamiento y clarificación del jugo de caña.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Definición de Corrosión.

Existen muchas definiciones para corrosión. La más comúnmente aceptada es la siguiente:

“Corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente”

Nótese que hay otras clases de daños, como los causados por medios físicos. Ellos no son considerados plenamente corrosión, sino *erosión* o *desgaste*. Existen además, algunos casos en los que el ataque químico va acompañado de daños físicos y entonces se presenta una *corrosión - erosiva, desgaste corrosivo* o *corrosión por fricción* [1].

2.2. Corrosión en materiales metálicos.

La corrosión afecta a la economía de los países. Esto se manifiesta en la pérdida irreversible anualmente de millones de toneladas de metales. Por ejemplo, a causa de la corrosión se pierde cerca del 10% de todo el metal ferroso producido [2].

En una serie de industrias, aparte de las pérdidas, los óxidos de los metales formados como resultado de la corrosión, impurifican los productos. Para evitarlo se generan gastos adicionales, especialmente en la industria alimenticia y en la fabricación de reactivos químicamente puros, etc [2].

2.3. Principios de la Corrosión.

La corrosión se debe definir como es el proceso inverso de un proceso metalúrgico. Los metales reaccionaran con los elementos no metálicos y la atmósfera del medio (H_2O , O_2 , H^+ , H_2S , CO_2 , etc.), produciéndose hidróxidos o sales, como se muestra en la figura 2.1.

Desde el punto de vista termodinámico, los metales están en un estado de energía alto. Esto significa que son inestables respecto a la mayoría de los ambientes y debido a ello

tienen una tendencia natural para regresar a su bajo estado energético, es decir, óxidos, tal como se encuentran originalmente en la naturaleza [3].

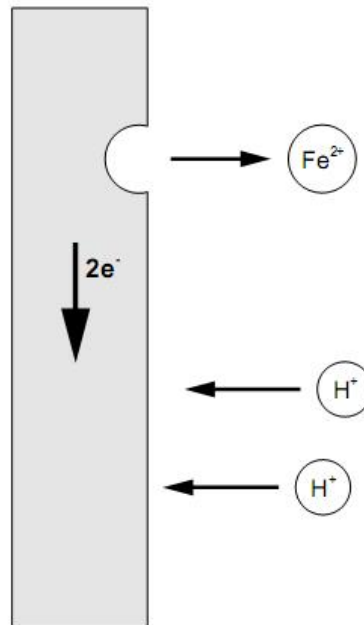


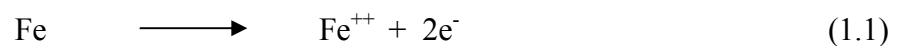
Figura 2.1. Corrosión del hierro en presencia del oxígeno [4].

2.4. Mecanismos básicos de la corrosión.

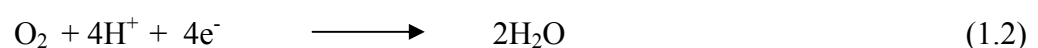
La corrosión es un proceso electroquímico. Los átomos metálicos se oxidan para formar iones positivos (cationes), mientras que otras especies químicas (por ejemplo O_2 y H_2O , o cationes existentes) son reducidas.

2.4.1. Corrosión en ácidos.

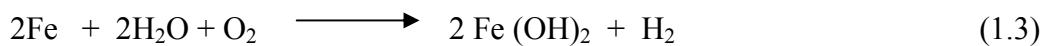
La reacción anódica general del hierro que se produce durante un proceso de corrosión es



La reacción catódica para corrosión en soluciones acidas en presencia de oxígeno es

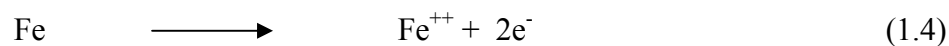


La reacción global se puede considerar como la suma de dos medias reacciones diferentes:



2.4.2. Corrosión en soluciones neutras

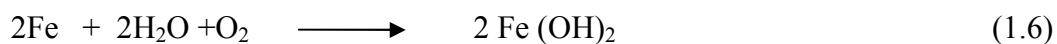
La reacción anódica general del hierro seguirá siendo la misma



La reacción catódica para corrosión en soluciones neutras en presencia de oxígeno es:



La reacción global será [5]:



2.5. Diferencia de potencial eléctrico.

La diferencia de potencial eléctrico es uno de los factores más influyentes en la corrosión. Los electrones liberados en el ánodo se consumen en el cátodo, creando una corriente a través de un electrolito. Existe una serie de fuerza electromotriz que sirve para comparar cuales elementos son anódicos en comparación con el hidrogeno. Los metales más activos de la parte superior de la lista exhiben una tendencia más fuerte a disolver que aquellos que aparecen al último de la lista, se muestran en la tabla 2.1 [6].

TABLA 2.1. SERIE ELECTROQUÍMICA DE LOS METALES [7].

| <i>Sistema</i> | <i>Semirreacción</i> | <i>Potencial E°, V A 25 °C</i> |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Li + / Li | Li + 1e ⁻ | Li -3.045 |
| K + / K | K + + 1e ⁻ | K -2.925 |
| Cs + / Cs | Cs + + 1e ⁻ | Cs -2.923 |
| Ba ²⁺ / Ba | Ba ²⁺ + 2e ⁻ | Ba -2.90 |
| Sr ²⁺ / Sr | Sr ²⁺ + 2e ⁻ | Sr -2.89 |
| Ca ²⁺ / Ca | Ca ²⁺ + 2e ⁻ | Ca -2.87 |
| Na + / Na | Na + + 1e ⁻ | Na -2.714 |
| Mg ²⁺ / Mg | Mg ²⁺ + 2e ⁻ | Mg -2.37 |
| Al ³⁺ / Al | Al ³⁺ + 3e ⁻ | Al -1.66 |
| Mn ²⁺ / Mn | Mn ²⁺ + 2e ⁻ | Mn -1.18 |
| Cr ²⁺ / Cr | Cr ²⁺ + 2e ⁻ | Cr -0.913 |
| V ³⁺ / V | V ³⁺ + 3e ⁻ | V -0.876 |
| Zn ²⁺ / Zn | Zn ²⁺ + 2e ⁻ | Zn -0.762 |
| Cr ³⁺ / Cr | Cr ³⁺ + 3e ⁻ | Cr -0.74 |
| Fe ²⁺ / Fe | Fe ²⁺ + 2e ⁻ | Fe -0.99 |
| Cd ²⁺ / Cd | Cd ²⁺ + 2e ⁻ | Cd -0.402 |
| In ³⁺ / In | In ³⁺ + 3e ⁻ | In -0.342 |
| Co ²⁺ / Co | Co ²⁺ + 2e ⁻ | Co -0.277 |
| Ni ²⁺ / Ni | Ni ²⁺ + 2e ⁻ | Ni -0.250 |
| Sn ²⁺ / Sn | Sn ²⁺ + 2e ⁻ | Sn -0.136 |
| Pb ²⁺ / Pb | Pb ²⁺ + 2e ⁻ | Pb -0.126 |
| Fe ³⁺ / Fe | Fe ³⁺ + 3e ⁻ | Fe -0.036 |
| H + / H ₂ | 2H + + 2e ⁻ | H ₂ 0.000 |
| Cu ²⁺ / Cu | Cu ²⁺ + 2e ⁻ | Cu 0.337 |
| Hg ²⁺ / Hg | Hg ²⁺ + 2e ⁻ | 2 Hg 0.789 |
| Ag ²⁺ / Ag | Ag ²⁺ + 1e ⁻ | Ag 0.799 |
| Hg ²⁺ / Hg | Hg ²⁺ + 2e ⁻ | Hg 0.857 |
| Pd ²⁺ / Pd | Pd ²⁺ + 2e ⁻ | Pd 0.987 |
| Pt ²⁺ / Pt | Pt ²⁺ + 2e ⁻ | Pt 1.19 |
| Au ³⁺ / Au | Au ²⁺ + 3e ⁻ | Au 1.50 |

2.6. Diagrama de Pourbaix.

El estudio del fenómeno de la corrosión ha despertado la curiosidad de investigar qué es lo que sucede electroquímicamente con el deterioro del metal, se conoce por ejemplo que un metal se disuelve con formación de iones metálicos a un potencial dado. A un potencial no hay disolución, y además dicho potencial no es afectado por el pH del medio. Entonces si el metal se disuelve y da un óxido o un hidróxido, la reacción ocurre a un potencial que depende del pH.

De la misma manera si se neutraliza una solución ácida que contenga iones metálicos, al llegar a un cierto pH forma precipitados de hidróxido. El valor del pH donde se da inicio a ésta precipitación puede ser calculado en función de la concentración de los iones metálicos.

Se debe tomar en consideración que, en muchos casos, si aumentamos el pH se llega a un valor límite por encima del cual los hidróxidos precipitados se redisuelven y dan aniones o iones complejos.

En conclusión, se puede señalar que estos datos son importantes en el estudio de la corrosión, pues en las condiciones en que se forman los productos solubles es de esperar que haya ataque corrosivo. En las condiciones en que si forma, productos insolubles, estos pueden entorpecer la corrosión y aún proteger el metal pasivándolo.

Desafortunadamente todos estos datos se hallan muy dispersos en la literatura y resulta muy engorroso tener que revisar las tablas y hacer cálculos cada vez que se quiere saber qué ocurre con un cierto metal a un potencial y pH dados. Pourbaix, encontró una forma ingeniosa de reunir estos datos en un solo diagrama. Para ello recurrir, a una representación del potencial en función del pH [8].

El Diagrama de Pourbaix refleja el comportamiento del hierro, frente a la corrosión en función de su potencial respecto al electrodo normal de hidrogeno y su pH. Como se muestra en la figura 2.2.

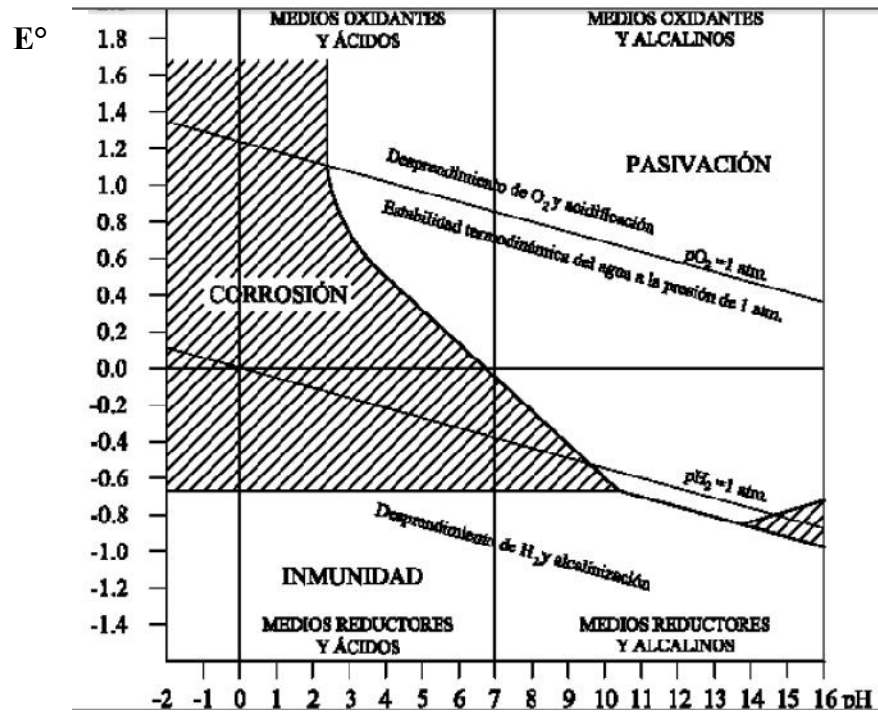


Figura 2.2. Diagrama de Pourbaix [9].

Este diagrama, representa las circunstancias teóricas de corrosión, de pasivación y de inmunidad del hierro en presencia de una solución acuosa a 25 °C. El examen de éste diagrama muestra la posibilidad de proteger al hierro por los tres métodos siguientes:

- Elevar el potencial hasta situarse en la zona de pasivación mediante la protección anódica.
- Alcalinizar el medio hasta superar el pH frontera entre la zona de corrosión y la de pasivación.
- Rebajar el potencial para situarse en la zona de inmunidad mediante la protección catódica [9].

2.7. Generalidades de la caña de azúcar.

2.7.1. Caña de azúcar.

La caña de azúcar (*Saccharum Offcinarum.L*) es una planta gramínea originaria de nueva Guinea desde donde se fue extendiendo hasta Asia y otros países tropicales y subtropicales. Esta planta consta de dos partes: una subterránea, carente de hojas es perenne, y otra aérea y anual, con hojas que llegan a alcanzar de dos a siete

metros de longitud. El color de la planta depende de las variedades y la floración se presenta durante el primer año del cultivo, como se muestra en la figura 2.3. Los climas apropiados para su explotación son tropicales y en ocasiones los subtropicales; los suelos más indicados los llanos ricos en calcio y próximos al mar.



Figura 2.3. Caña de azúcar.

El tronco de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas. Las proporciones de los componentes varían de acuerdo con la variedad de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, etc. La sacarosa del jugo es cristalizada en el proceso como azúcar; la fibra constituye el bagazo una vez molida la caña.

2.7.2. Composición del jugo de caña.

La caña de azúcar presenta un alto contenido de azúcares solubles, específicamente sacarosa, y azúcares insolubles de origen estructural, especialmente celulosa, hemicelulosa y lignina (tabla 2.2) de acuerdo con los datos de Cuarón y Shimada (1981).

TABLA 2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AZÚCAR ENTERA [10].

| Fracciones | %MS |
|----------------------|------------|
| Materia seca | 29 |
| Cenizas | 5 |
| Lignina | 7 |
| Celulosa | 27 |
| Hemicelulosa | 20 |
| Azúcares solubles | 40 |
| Proteína | Nx6.252 |

Entre las condiciones agroecológicas ideales para la producción de caña se encuentran (ICA, 2002; Naranjo, 1993): Ubicación del cultivo entre 500 y 1500 metros sobre el nivel del mar con una temperatura promedio de 25 °C, disponibilidad luminosa de 5 a 8 horas diarias y precipitación anual de 1500 a 1750 mm, vientos cálidos y secos con humedad relativa (HR) entre 75 y 80% y suelos franco arcillosos con buen drenaje y pH entre 5.5 y 7.5.

El contenido de azúcar en la caña, así como su composición, varía mucho de un país a otro y dentro de un mismo país según la variedad y la técnica de cultivo. En la tabla 2.3 se presentan la composición promedio de la caña de azúcar y del jugo de caña [11].

TABLA 2.3. COMPOSICIÓN DEL JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR [11].

| Componente | Porcentaje,% |
|---------------------|---------------------|
| Agua | 81-85 |
| Sólidos solubles | 15-19 |
| Sales | 0.23-0.67 |
| Proteínas | 0.08-0.11 |
| Gomas- Almidones | 0.05-0.11 |
| Azúcares | |
| Sacarosa | 12.5-16.72 |
| Glucosa | 0.3-0.76 |
| fructosa | 0.3-0.76 |

2.7.3. Conductividad.

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica, es decir, para permitir el paso a través de él de partículas cargadas, bien sean los electrones, los transportadores de carga en conductores metálicos o semi metálicos, o iones, los que transportan la carga en disoluciones de electrolitos.

2.7.4. Conductividad en medios líquidos.

La conductividad en medios líquidos (Disolución) está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos [12].

Se realizó el análisis químico de conductividad del jugo de caña obtenido de la caña nativa de la región, Anexo A obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la tabla 2.4.

TABLA 2.4. ANÁLISIS QUÍMICO DEL JUGO DE CAÑA.

| Determinaciones | Unidades | *Método | Resultados |
|-----------------|-----------|---------|------------|
| Conductividad | μSiems/cm | 2510-B | 198.5 |

2.8. Estudio de la cachaza y de la vinaza.

2.8.1 Cachaza.

La cachaza, es un producto sólido y oscuro, con un elevado contenido de humedad (54%) y gran cantidad de materia orgánica, su aspecto es gris oscuro, similar a su compostaje, se obtiene después de clarificar y filtrar el jugo de caña, en el proceso de fabricación de azúcar es conocida como torta de filtro (Filter cake en inglés).

La cachaza presenta 75% de agua, 2 a 3% de ceras, 7% de arcillas y cenizas y 15% de bagazo y azúcares. El nitrógeno se encuentra en la forma de proteínas y otras formas amoniacales simples o en forma cítrica. El fósforo se encuentra combinado con moléculas orgánicas como fosfolípidos y nucleoproteínas [13].

2.8.2. Proceso de la obtención de la cachaza.

La cachaza se obtiene a través de la clarificación del jugo de caña obtenido en la etapa de molienda. Este proceso consiste en adicionar una solución (lechada) de óxido de calcio-CaO al jugo de caña para elevar su pH (pH aproximado 5,2) y precipitar impurezas orgánicas y/o inorgánicas que vienen en el jugo y para aumentar o acelerar su poder coagulante se eleva la temperatura del jugo encalado mediante un sistema de tubos calentadores. La clarificación del jugo se da por sedimentación; los sólidos no azúcares se precipitan en forma de lodo llamado cachaza y el jugo claro queda en la parte superior del tanque. Este jugo sobrante se envía a los evaporadores y la cachaza sedimentada que todavía contiene sacarosa pasa a un proceso de filtración antes de ser desechada al campo, como se muestra en la figura 2.4 [14].



Figura 2.4 Obtención de la cachaza [15].

En la tabla 2.5, se puede observar la composición bromatológica típica de la cachaza o torta filtro.

TABLA 2.5 COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA DEL JUGO DE CAÑA [16].

| Componentes | Cachaza |
|----------------------------|---------|
| Materia seca (%) | 90.83 |
| Proteína cruda (%) | 11.50 |
| Cenizas (%) | 20.35 |
| Carbohidratos solubles (%) | 59.59 |
| Ca (%) | 2.94 |
| P (%) | 0.49 |

2.8.3. Vinaza.

La vinaza es un material orgánico líquido resultante de la fermentación de la melaza y posterior destilación de alcohol y está compuesta por agua, sales minerales, materia orgánica (levaduras muertas) y constituyentes no fermentables de la melaza. Es considerado un residuo corrosivo de elevado potencial contaminante, en la figura 2.5 se muestra el aspecto de la cachaza en los depósitos [16].



Figura 2.5 Aspecto de la cachaza [15]

En la tabla 2.6, se puede observar la composición bromatológica típica de la vinaza de caña en Colombia de 55% y de 10% de sólidos totales (s.t).

TABLA 2.6 CARACTERÍSTICAS DE LAS VINAZAS OBTENIDAS EN COLOMBIA [17].

| Análisis | Vinaza 55% s.t | Vinaza 10% s.t. |
|--------------------------------|----------------|-----------------|
| Materia orgánica % | 39 | 14-23 |
| N kg/m ³ | 2.75 | 0.63-1.14 |
| P kg/m ³ | 0,56 | 0.07-0.25 |
| K kg/m ³ | 59.80 | 28.56 |
| Ca kg/m ³ | 1.90 | 9.60 |
| Mg kg/m ³ | 9.00 | 4.37 |
| S (Sulfatos) kg/m ³ | 2.19 | 3.88 |
| Na kg/m ³ | 2.52 | 0.68 |
| Cu kg/m ³ | 0.006 | 0.00048 |
| Fe kg/m ³ | 0.278 | 0.09775 |
| Mn kg/m ³ | 0.36 | 0.12 |
| Zn kg/m ³ | 0.016 | 0.0065 |
| pH | 4.3-4.5 | 3.5-4.3 |
| Densidad kg/m ³ | 1.35 | 1.03 |
| Cond.Eléctrica dS/m | 17 | 11.0 |

2.9. Determinación de pH.

La medición potenciométrica de pH se basa en la diferencia entre el potencial eléctrico de una solución y de un electrodo. Esta medición es relativa y depende del tipo del electrodo y la temperatura. El pHmetro debe ser calibrado con soluciones estándares de pH conocido. Para determinar el pH del jugo de caña, se realizó un análisis químico

en el laboratorio de análisis técnicos de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Anexo A, obteniendo los siguientes resultados que se presentan en la tabla 2.7.

TABLA 2.7 DETERMINACIÓN DEL pH DEL JUGO DE CAÑA.

| Determinaciones | Unidades | *Método | Resultados |
|-----------------|----------|---------|------------|
| pH | Und. | 4500-B | 5.32 |

Para la obtención del jugo, se empleó un molino de dos masas mediante el paso de la caña entre éstas, previo un lavado de la materia prima como se muestra en la figura 2.6. El jugo obtenido tuvo un pH promedio de 5.3 y de 19 a 22° Brix de acuerdo al grado de madurez de la caña. La temperatura del jugo de caña se puede estimar alrededor de unos 20 °C.



Figura 2.6 Obtención del jugo de caña

Los resultados de los análisis microbiológicos del jugo de la caña de azúcar que se utiliza en la elaboración del azúcar en el micro ingenio ASPROCA se muestran en la tabla 2.8, Anexo B.

TABLA 2.8. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.

| DETERMINACIONES | METODO USADO | VALOR ENCONTRADO |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Coliformes Totales UFC/ml</i> | Vertido en placa | 2000 |
| <i>Coliformes Fecales UFC/ml</i> | Vertido en placa | 500 |
| <i>Aerobios mesófilos UFC/ml</i> | Vertido en placa | 70 |
| <i>Mohos y Levaduras UFC/ml</i> | Extensión en superficie | 500 |

2.10. Variables Físicas del Agua.

2.10.1. Temperatura del agua.

A mayor temperatura se tendrá mayor corrosividad debido a que se aceleran todas las reacciones involucradas. En un sistema abierto a la atmósfera, la corrosividad puede primeramente aumentar al subir la temperatura y entonces con un nuevo incremento de temperatura el fenómeno corrosivo puede disminuir debido a que los gases disueltos salen de la solución. Si el sistema es cerrado, la corrosión continuara subiendo con la temperatura debido a que los gases no evacuan con la solución [18].

2.10.2. Presión del Sistema.

La presión también tiene efectos sobre las reacciones químicas, en el caso del agua, lo más importante es el efecto en la solubilidad de los gases disueltos al aumentar la presión, mayor cantidad de gas se disuelve y por lo tanto la corrosividad se incrementa [18].

2.10.3. Velocidad del agua.

Las velocidades bajas del agua, generalmente generan corrosión generalizada baja y preferentemente se manifiestan en forma de pitting. Los índices de corrosión en aguas que contienen pequeñas cantidades o no contienen sólidos suspendidos, son mínimos, sin embargo esto se incrementan con el aumento de la velocidad.

Altas velocidades y la presencia de sólidos suspendidos o principalmente la presencia de burbujas de gas pueden conducir a una corrosión por erosión (cavitación).

Cualquier film protector es constantemente removido dejando la superficie metálica libre, la cual facilita que ésta se corroa [18].

2.11. Análisis químico de agua utilizado en el proceso de producción.

Para poder determinar las propiedades químicas que tiene el agua que se utiliza en el proceso de producción del micro ingenio azucarero ASPROCA, se tomó una serie de muestras las mismas que fueron llevadas al Laboratorio de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica para su análisis y estudio respectivo, determinando los siguientes parámetros:

2.11.1. Determinación del pH.

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H^+) en una sustancia.

La acidez es una de las propiedades más importantes del agua. El agua disuelve casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua.

El pH del agua puede variar entre 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica. Cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida. Cuanto más se aleje el pH por encima o por debajo de 7, más básica o ácida será la solución [19].

2.11.2. Dureza del agua.

La dureza es una característica química del agua que está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio. La dureza es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial. En calderas y sistemas enfriados por agua, se producen incrustaciones en las tuberías y una pérdida en la eficiencia de la transferencia de calor.

Dureza como $CaCO_3$ Interpretación 0-75 agua suave 75-150 agua poco dura 150-300 agua dura > 300 agua muy dura.

En agua potable, el límite máximo permisible es de 300 mg/l de dureza. En agua para calderas el límite es de 0 mg/l de dureza [20].

2.11.3. Conductividad del Agua.

La corrosión del agua se incrementa conforme la conductividad aumenta. El agua destilada es poco corrosiva al ser mala conductora en cambio el agua salada es completamente corrosiva ya que es una buena conductora [19].

Conductividad en distintos tipos de aguas:

- Agua Ultra Pura $5.5 \cdot 10^{-6}$ S/m
- Agua potable 0.005 – 0.05 S/m
- Agua del mar 5 S/m

2.11.4. Cloruros.

Los cloruros son una de las sales que están presentes en mayor cantidad en todas las fuentes de abastecimiento de agua y de drenaje.

El cloruro es esencial en la dieta y pasa a través del sistema digestivo, inalterado.

Un alto contenido de cloruros en el agua para uso industrial, puede causar corrosión en las tuberías metálicas y en las estructuras.

La máxima concentración permisible de cloruros en el agua potable es de 250 ppm, este valor se estableció más por razones de sabor, que por razones sanitarias [19].

2.11.5. Gases disueltos.

El oxígeno, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico disueltos en el agua incrementan la corrosión drásticamente, de hecho, los gases disueltos son la principal causa de la mayoría de los problemas de corrosión.

De los tres gases mencionados, el oxígeno es el que causa los problemas de corrosión más severos.



El oxígeno no está presente en el agua de producción pero frecuentemente se pone en contacto en la superficie la solubilidad del oxígeno en el agua está en función

de la presión, temperatura y contenido de cloruros, el oxígeno es menos soluble en agua salada que en agua fresca.

Cuando el dióxido de carbono está disuelto en agua, él mismo forma ácido carbónico, disminuye el pH del agua e incrementa su corrosividad. No está corrosivo como lo es el oxígeno y usualmente resulta en pitting [19].

El análisis químico del agua utilizada en el proceso de producción del azúcar en el micro ingenio azucarero ASPROCA, fue realizado en el Laboratorio de Análisis Técnicos de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo obteniendo los siguientes resultados que son mostrados en la tabla 2.9, Anexo C.

TABLA 2.9. ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA.

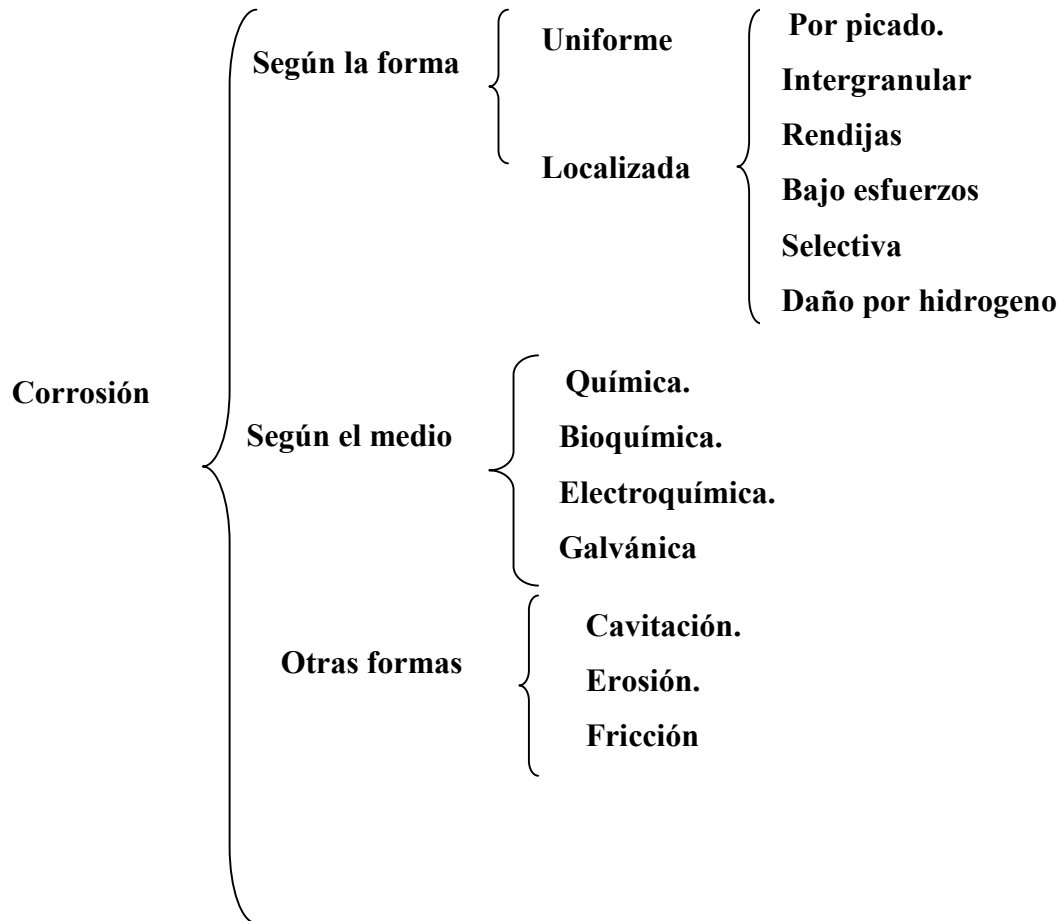
| Determinación | Unidades | Método | Resultados |
|--|-----------------|-------------------------|-------------------|
| pH | Un | 4500-B | 7,01 |
| Conductividad | μSiems/cm | 2510-B | 82,6 |
| Dureza como CaCO ₃ | mg/L | 2340-C | 48 |
| Cloruros | mg/L | 4500-Cl-B | 21,2 |
| Sulfatos | mg/L | 4500-SO ₄ -E | 4,5 |
| Alcalinidad de Bicarbonatos expresada como CaCO ₃ | mg/L | 2320-C | 44,0 |
| Anhídrido carbónico | mg/L | 4500-CO ₂ -D | 15,12 |
| Oxígeno Disuelto | mg/L | 4500-O-C | 6,1 |
| Hierro | mg/L | 3500-Fe-D | 0,14 |

CAPÍTULO III

3. AMBIENTE CORROSIVO.

3.1. Tipos de Corrosión.

Para su estudio las formas de corrosión pueden ser clasificadas según el medio en que se desarrollan o según su morfología [21].



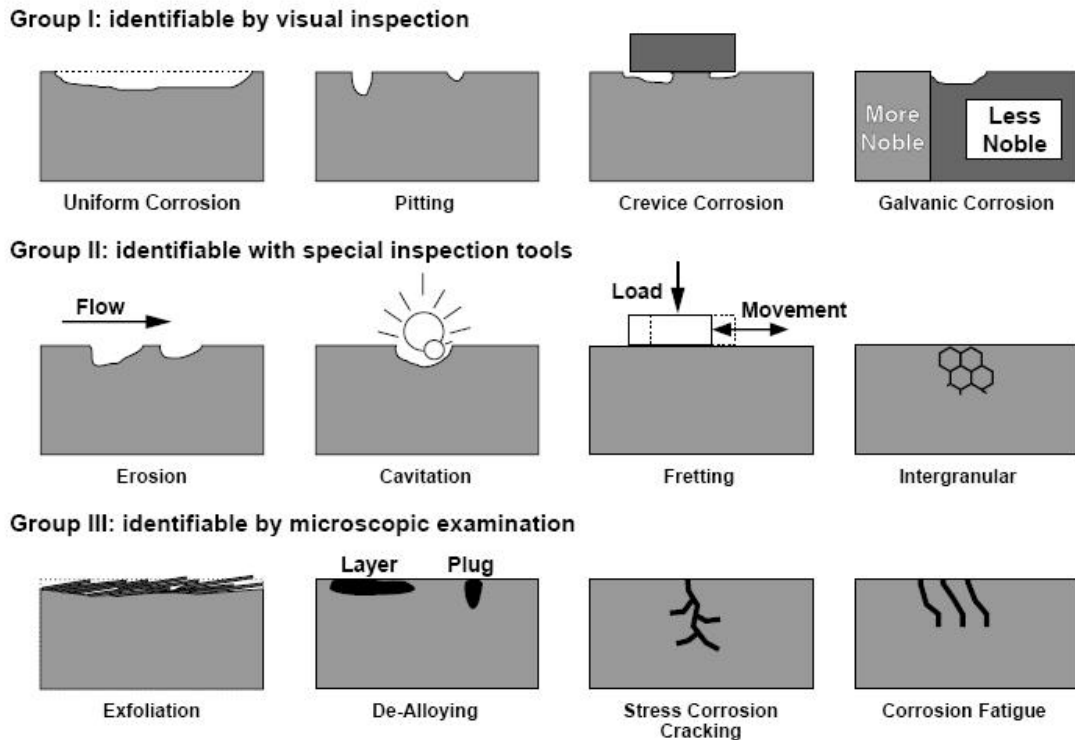


Figura 3.1. Principales formas de corrosión reagrupadas por su facilidad de reconocimiento [22].

3.2. Según el medio.

3.2.1. Corrosión Química.

Este tipo de corrosión se produce cuando el metal reacciona con un medio no iónico (por ejemplo oxidación en aire a altas temperaturas). Se imagina que se expone una superficie metálica limpia a la acción del oxígeno, el metal comenzará a reaccionar con el oxígeno formando óxidos. Se tiene el caso de Fe (metal que presenta más de una valencia) calentada al aire seco, por encima de 500°C se oxida a apreciable velocidad formando una película como se muestra en la figura 3.2 [21].

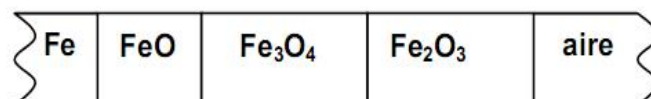


Figura 3.2 Oxidación del hierro [21].

Se producen reacciones redox sin la intervención de iones en solución y no ha habido corrientes eléctricas recorriendo el metal.

Si el grado de corrosión se expresa como aumento de peso (por el óxido formado) por unidad de área, se observa que la corrosión se propaga en forma lineal con el tiempo, como se observa en la figura 3.3. [21]

$$\text{Corrosión} = K \cdot \text{tiempo} \quad (3.1)$$

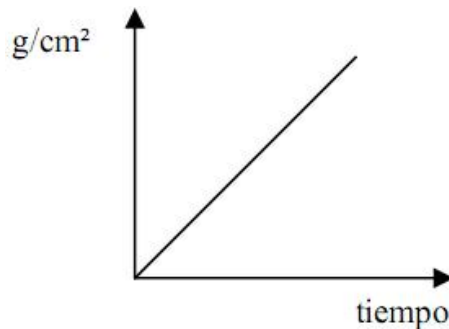


Figura 3.3. Propagación lineal [21].

3.2.2. Corrosión Bioquímica.

Es el deterioro del metal causado directa o indirectamente por bacterias, moho y hongos en forma individual y combinada. Puede ocurrir en diversos sistemas de conducción de aguas como se muestra en la tabla 3.1 [23].

TABLA 3.1. SITIOS Y DAÑOS MÁS COMUNES DE LOS MICROORGANISMOS [23].

| Sitio | Daño |
|---|--|
| Sistemas de enfriamiento | Corrosión en tubos intercambiadores de calor con picadura severa |
| Sistemas de Distribución | Paquetes de agua de mala calidad, biocorrosión y biofouling |
| Tanques o en las mismas formaciones de yacimientos por aguas provenientes de operaciones de la producción de petróleo | Graves problemas de corrosión taponamiento de líneas. |

3.2.2.1. Corrosión por influencia biológica en sistemas de enfriamiento.

Entre los mecanismos básicos de corrosión se tiene el ataque activo de sustancias producidas biológicamente, ataque pasivo de sustancias producidas biológicamente. La corrosión biológica activa, se puede definir como la interacción de organismos con materiales para producir reacciones químicas corrosivas que produce una corrosión intensa y localizada con una mayor incidencia de perforaciones. El ataque pasivo se define como un desgaste como consecuencia indirecta de la biomasa y los productos biológicos, involucra una corrosión debajo de los depósitos y engloba áreas grandes con una mayor cantidad de pérdida de metal por peso [23]

3.2.2.2. Corrosión biológica activa.

Influyen principalmente microorganismos aerobios o anaerobios, cada variedad de bacterias causa una corrosión cuando nuevas reacciones que ocurren en ánodos y/o cátodos en una celda electroquímica. Entre los factores que afectan la agresividad de las bacterias corrosivas están: temperatura, concentraciones de carbono orgánico total y de nitrógeno, el flujo, las concentraciones de oxígeno o de amoníaco, el tratamiento químico, pH y otras. Existen cuatro clases principales de bacterias implicadas en la corrosión en los sistemas de agua de enfriamiento [23].

- Sulfatoredutoras (Reductoras de sulfatos)
- Productoras de ácido
- Depositadoras de metales
- Formadoras de babaza
- Otras bacterias

3.2.2.3. Lugares.

El ataque microbiológico suele ocurrir donde la temperatura del agua está por debajo de los 82°C (180 °F), las masas de babazas ensucian cajas de agua, tubos en los intercambiadores de calor y placas de tubos. El crecimiento de algas cubre a las torres de enfriamiento y obstruye coladores y entradas de agua. El crecimiento de hongos

causa la podredumbre de la madera en torres de enfriamiento. Los tubérculos sobre el acero al carbono y los hierros vaciados a veces contienen bacterias sulforeductoras y productoras de ácidos.

Las bacterias anaerobias corrosivas en potencia están presentes muchas veces debajo de capas de babazas y, en la ausencia de babazas o tubérculos, en sistemas que contengan poco oxígeno. Los sistemas sucios con aceites y grasas generalmente contienen números grandes de bacterias. Los organismos grandes (aquellos observables a simple vista) son un indicador seguro de la presencia bacterial y directamente pueden causar un ataque [23].

3.2.2.4. Identificación.

Toda forma de corrosión con influencia biológica se puede reconocer mediante el examen de las morfologías del desgaste, la composición y distribución de los productos de corrosión, la composición y distribución de los depósitos, los análisis biológicos y las condiciones ambientales compatibles. La sola presencia de bacterias corrosivas potenciales u otros organismos no es prueba de que la corrosión se relacione con estos organismos. El diagnóstico no se basa en una preponderancia de indicios; se basa en la compatibilidad completa de toda la evidencia [23]

3.2.2.5. Sulfatorreductoras.

Las sulfatorreductoras activas viven en ambientes anaerobios. Estos ambientes pueden estar sumamente localizados, tal como dentro de un tubérculo o debajo de un depósito manchado. Es dificultoso percibir una biopelícula delgada y bastante regular en tales microambientes. Las bacterias sulfatorreductoras muchas veces causan un ataque localizado intenso, figuras 2.9 y 2.10. Se forman unas depresiones hemisféricas discontinuas con la mayoría de las aleaciones, incluyendo aceros inoxidables, aluminio, Carpenter 20 y aceros al carbono [24].

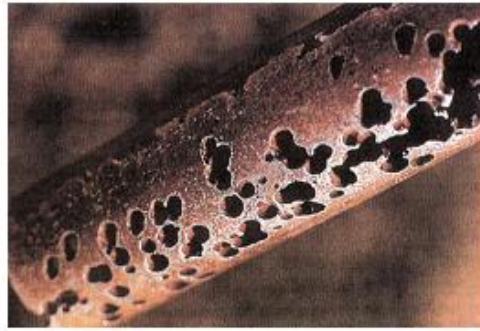


Figura 3.4 Tubo de aluminio picado por sulfato reductoras [24].



Figura 3.5 Picadura de un tubo por sulfato reductoras [24].

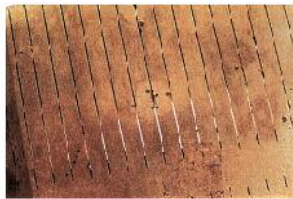


Figura 3.6 Picaduras de una placa de AISI 316 [24].

3.2.2.6. Identificación de problemas microbiológicos.

La sola presencia de bacterias en el agua no necesariamente significa un problema grave y lo opuesto, un bajo conteo de bacterias tampoco significa necesariamente que no exista un grave problema, puesto que las bacterias pueden estar escondidas debajo de depósitos y solo aparecen cuando la corriente de fluido o un fenómeno mecánico las descubre. La presencia de sulfuro de hidrogeno en el agua puede indicar la existencia de sulfatorreductoras, si el agua a la entrada del sistema estaba libre de H_2S . También la presencia de partículas negras de FeS en el agua puede indicar que el H_2S se está produciendo en el sistema.

Usando el término de corrosión en el mejor de los sentidos; los microorganismos causan corrosión por:

- a. Ataque químico de metales, concreto y otros materiales, debido a los subproductos de la vida microbiana, ácidos comunes (ej. sulfúrico, carbónico u otros ácidos orgánicos), sulfuro de hidrogeno o amoníaco.
- b. Ataque microbiológico de materiales orgánicos (ej. pinturas orgánicas de recubrimiento, conexiones de tubería plásticas y encamisados), algunas materias inorgánicas naturales, (ej. azufre) o inhibidores.
- c. También causa la despasivación de superficies metálicas e induce celdas de corrosión.
- d. Ataca metales por un proceso en el cual los microbios y el metal cooperan entre sí para sostener la reacción de corrosión.
- e. El ataque puede ser por combinación de bacterias [24].

3.2.2.7. Control de microorganismos.

Existe una amplia variedad de productos químicos usados para controlar el crecimiento de bacterias en el agua. Se pueden clasificar en bactericidas o bacteriostatos de acuerdo a si matan o retardan el crecimiento de las bacterias. Puede ser inorgánicos, como el cloro, los cromatos y compuestos de mercurio y plata u orgánicos como aminas, clorofenoles, derivados cuaternarios del amoníaco, etc. Algunos bactericidas tienen una función dual en el sistema. Las aminas cuaternarias funcionan tanto como biocidas como inhibidores filmicos de corrosión. La adición insuficiente de estos químicos para cubrir adecuadamente el sistema puede dejarlo desprotegido contra la corrosión. Los bactericidas no pueden matar las bacterias a menos que entren en contacto con ellas. Esto significa que las bacterias que crezcan debajo de depósitos no serán destruidas a menos que estos sean removidos. Por lo tanto, la operación de limpieza es fundamental antes de iniciar la aplicación de un biocida. Esto incluye limpieza de líneas, retrolavado de pozos y equipos, remoción de depósitos del fondo de tanques, etc. El procedimiento más fácil de limpieza consiste en utilizar biocidas con propiedades detergentes [24].

3.2.2.8. Medidas Preventivas.

- Analizar con exactitud posibilidades de contaminación.
- Proveer para controlar el medio químico.
- Inhibir o proveer adición de germicidas.
- Propiciar ambiente no agresivo o asegurar la remoción controlada de nutrientes de microbios.
- Seleccionar materiales de recubrimiento [24].

3.2.3. Corrosión Electroquímica.

La corrosión por acción electroquímica es la que tiene lugar sobre los metales expuestos a la atmosfera húmeda, o sumergidos en agua, enterrados, o inmersos en medios electrolíticos (agua de mar, soluciones de ácidos, sales y álcalis).

En los casos de corrosión electroquímica hasta ahora considerados, ha sido el propio metal o los dos metales en contacto o muy próximos los que han proporcionado la fuerza electromotriz para la corrosión. Por esto la velocidad de ataque y por tanto, la corrosión esta forzosamente limitada. Pero cuando se aplica una fuerza electromotriz exterior, las velocidades de corrosión pueden ser mucho mayores [25].

3.2.3.1. Polarización.

El proceso de corrosión electroquímica corresponde a los procesos que tienen lugar en los electrodos de una pila galvánica, corresponde conocer los potenciales de los mismos cuando a través de ellos circula corriente, es decir cuando el circuito se ha cerrado (pila cortocircuitada). La determinación de los potenciales de los electrodos de una pila cuando por ellos circula corriente muestra que dichos potenciales varían apreciablemente. Esta variación en el potencial de los electrodos cuando se hace circular corriente por los mismos, se conoce como *polarización*. Es decir que la polarización es el cambio en el potencial de un electrodo a medida que la corriente fluye de o hacia él.

Existen diversas causas de la polarización entre ellas se consideran:

- a. Concentración iónica localizada en las zonas anódicas y catódicas aumentadas o disminuidas debido a que la difusión de iones en un medio líquido es lenta.

- b. Películas de superficie, las películas de superficie pueden estar presentes desde antes del instante en que el metal y medio se pongan en contacto pero también pueden formarse posteriormente como productos de las reacciones de corrosión.

Las sustancias que las constituyen pueden ser sólidas (por ej: un producto anódico insoluble, un óxido) o gaseosas (por ej: películas o aún burbujas de gases como oxígeno o hidrógeno). Estas películas disminuyen o impiden la difusión de iones o sustancias sin carga que forman parte de las reacciones de corrosión (por ej: la llegada de gas oxígeno) [21].

3.2.4. Corrosión Galvánica.

La corrosión Galvánica es una de las más comunes que se pueden encontrar. Es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos (con distinto par redox) se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (por ejemplo, una solución conductiva).

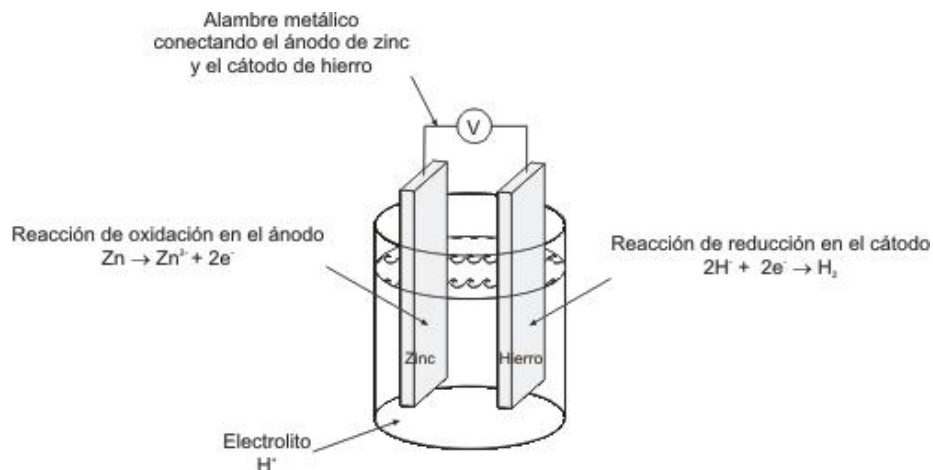


Figura 3.7 Corrosión Galvánica [26].

El ataque galvánico puede ser uniforme o localizado en la unión entre aleaciones, dependiendo de las condiciones. La corrosión galvánica puede ser particularmente severa cuando las películas protectoras de corrosión no se forman o son eliminadas por erosión.

Esta forma de corrosión es la que producen las Celdas Galvánicas. Sucede que cuando la reacción de oxidación del ánodo se va produciendo se van desprendiendo

electrones de la superficie del metal que actúa como el polo negativo de la pila (el ánodo) y así se va produciendo el desprendimiento paulatino de material desde la superficie del metal. Este caso ilustra la corrosión en una de sus formas más simples.

Para que se produzca la corrosión no es necesario que los metales estén en contacto, sino que es suficiente que se encuentren en las proximidades y tampoco hace falta una solución salina, pues la corrosión se produce en un metal enterrado si en las proximidades hay otro catódico respecto a él.

Entre dos metales diferentes usualmente existe una diferencia de potencial cuando ellos son sumergidos en una solución corrosiva, cuando los dos metales están conectados eléctricamente y son sumergidos en un electrolito, fluirá corriente desde el un metal hacia el otro la corriente fluye (ánodo), se corroerá y el metal hacia el cual la corriente fluye (cátodo) tenderá a protegerse de la corrosión [26].

3.3. Según la forma.

3.3.1 Corrosión Uniforme.

Es aquella por la cual el ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie de un metal y la penetración media es igual en todos los puntos. Un ataque de este tipo permite calcular fácilmente la vida de los materiales corroídos. Es la forma menos peligrosa en la que se puede presentar la corrosión y la más común.

Los factores que influyen en la severidad de la corrosión atmosférica son:

- a. La presencia de exceso de oxígeno. El oxígeno actúa como oxidante del metal y en la despolarización de los cátodos.
- b. Humedad relativa. La humedad relativa crítica está comprendida en general entre 50 y 70% para el acero, cobre, níquel, zinc. Por debajo de este rango de humedad relativa crítica no hay corrosión apreciable.
- c. Temperatura. La humedad relativa aumenta cuando baja la temperatura.
- d. Contaminantes. En orden de cantidad, el polvo es el principal contaminante de muchas atmosferas [27].

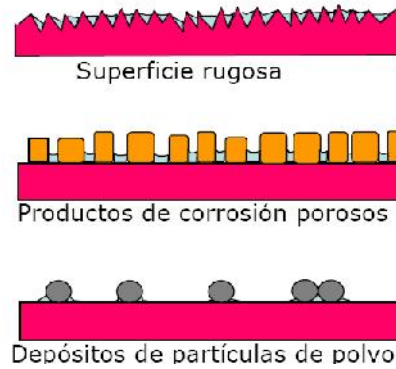


Figura 3.7 Motivos de condensación del agua [28].

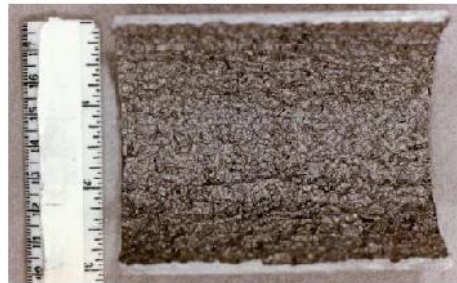


Figura 3.8 Corrosión uniforme en tuberías [29].

3.3.2. Corrosión Localizada.

En este tipo de corrosión el ataque se extiende en el metal en forma no uniforme, es decir a diferente velocidad en cada tramo de superficie. Se manifiesta en unos sitios más que otros, las reacciones de este tipo de corrosión son químicas y electroquímicas.

En los casos de “*ataque localizado*” la cantidad de material afectado no guarda relación con los inconvenientes que puede causar.

La corrosión localizada comprende los siguientes tipos: corrosión por picado, corrosión en rendijas, corrosión bajo tensión [30].

3.3.2.1. Corrosión por Pitting.

Es un ataque que produce huecos o cavidades generalmente pequeñas, que incluso pueden traspasar completamente a ciertos elementos mecánicos.

Esta es una de las más destructivas y peligrosas formas de corrosión después de la corrosión bajo tensión por las siguientes razones:

- a. Son muy difíciles de detectar, debido a su diámetro tan pequeño y por estar frecuentemente cubiertos por productos de corrosión pasan inadvertidos.
- b. Son muy localizados e intensos los ataques, por lo que las fracturas ocurren inesperadamente sin que se pueda controlar.
- c. Son muy difíciles de predecir en pruebas de laboratorio debido en que tardan meses o años en manifestarse.
- d. Son difíciles de evaluar cuantitativamente.

Los factores que más afectan la velocidad del picado (pitting) son:

- a. La velocidad de regeneración de la capa pasivada. A mayor velocidad de regeneración de la capa pasivada menor capacidad de picado.
- b. La composición .Los elementos aleantes Cr, Ni, Mo aumentan la resistencia al picado. En cambio los elementos Si, S disminuyen.
- c. La estructura metalográfica. Mientras más homogénea sea una estructura metalográfica menor es la posibilidad de picado.
- d. El porcentaje de trabajo en frío [31].

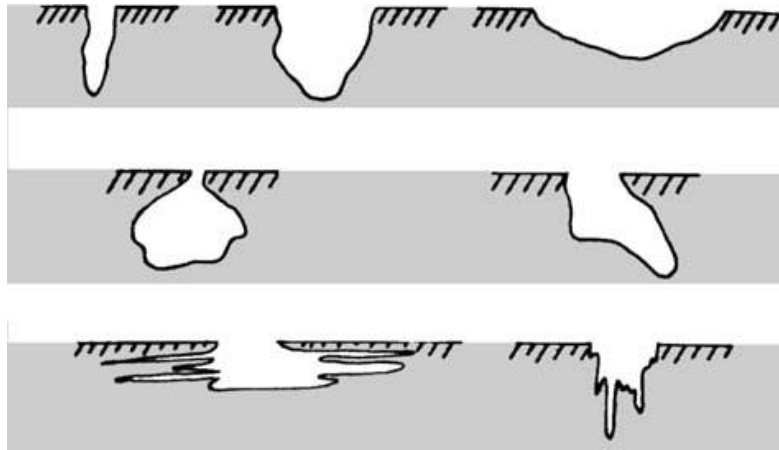


Figura 3.9 Diferentes formas de corrosión por picadura [32].

3.3.2.2. Corrosión bajo tensión.

Es la que ocurre bajo la acción combinada de esfuerzos de tensión y medios corrosivos. Los esfuerzos pueden ser residuales o aplicados. Muchas fallas por corrosión y esfuerzo entrañan grandes esfuerzos residuales que pueden ser producto de enfriamiento desigual, la precipitación y la transformación de fase, un diseño pobre, el trabajo en frío y soldadura. Son necesarias la presencia del esfuerzo tensil y del medio ambiente corrosivo específico, para que ocurra el agrietamiento por corrosión y esfuerzo.

La mayor parte de las aleaciones comerciales son susceptibles a agrietamiento por corrosión bajo tensión, cuando están expuestas a ciertos medios ambientes específicos. Los metales puros son relativamente inmunes al agrietamiento por corrosión y esfuerzo.

Los factores importantes que afectan el proceso de corrosión bajo tensión son:

- a. La magnitud del esfuerzo a que está sometido el metal.
- b. Naturaleza y agresividad del medio corrosivo.
- c. Tiempo de permanencia del metal en ese medio y bajo ese esfuerzo.
- d. Características geométricas del metal
- e. Composición química del metal.
- f. Estructura metalográfica del metal.

g. Temperatura [33].

3.4. Otras formas de corrosión.

3.4.1. Corrosión por cavitación.

Se produce por el choque o colapso de burbujas que se forman en puntos, en los que la presión local es igual o inferior a la presión del vapor de líquido. El daño puede involucrar ambos factores químico y mecánico, particularmente si la película protectora es destruida.

La cavitación es causada por la formación de burbujas de aire o cavidades llenas de vapor en zonas de baja presión del flujo de líquidos. Cuando un líquido pasa rápidamente de una zona de baja presión a otra de alta presión, como en los impulsores de bombas, se generan flujos a grandes velocidades en conductos curvos, las cavidades de aire o vapor chocan contra una superficie sólida, y causan desgaste en el metal por abrasión o erosión.

Las burbujas se producen en zonas en las cuales la presión estática baja disminuye a un valor menor de la presión de vapor del líquido. El material sufre un deterioro superficial considerable que suele ocurrir en forma de picaduras. La cavitación produce una vibración y ruido fuerte, debido al colapso o al choque de burbujas.

Daños por cavitación ocurren también en turbinas hidráulicas, en cambios repentinos en la sección transversal y otras superficies donde se produce cambios de flujo y presión a elevada velocidad. Como se puede observar en la figura 3.10 [34].

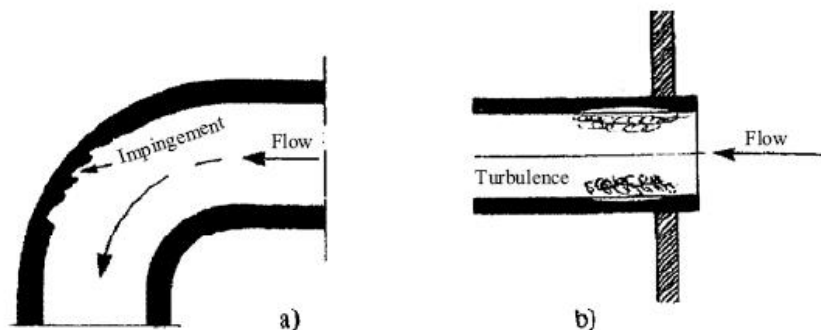


Figura 3.10. Corrosión por cavitación [35].

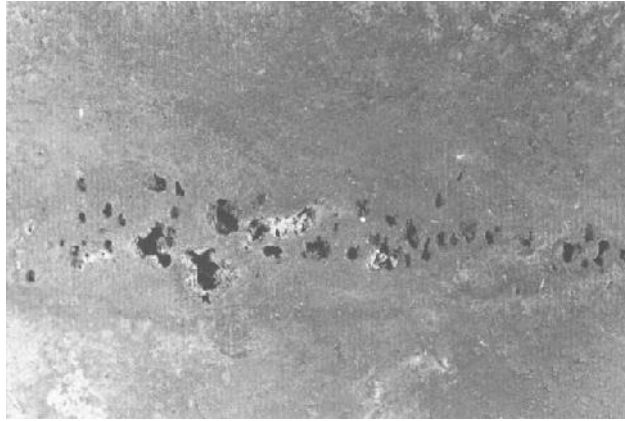


Figura 3.11. Daños de corrosión por cavitación [36].

3.4.2. Corrosión por erosión.

En el ataque que se produce en el metal debido al movimiento relativo entre un fluido corrosivo (Gases, vapores y líquidos) y la superficie metálica. generalmente, este movimiento es muy rápido (flujo turbulento) y produce un efecto mecánico o abrasivo en la superficie metálica, debido a que el fluido puede contener partículas sólidas en suspensión, un líquido penetra en los poros del metal y en su subsecuente escape, puede arrastrar consigo de metal, mientras más poroso sea un material, más severo el ataque.

La rapidez de corrosión aumenta en gran medida con la presencia de medios mecánicos o abrasivos como líquidos moviéndose a grandes velocidades, sólidos en suspensión, turbulencia y choques notables.

A veces las fallas de piezas debido a la corrosión por erosión ocurren en un tiempo relativamente corto, en forma inesperada por la acción conjunta de corrosión y desgaste por erosión.

Los principales factores que influyen en este tipo de corrosión son:

1. Presencia de sólidos en suspensión.
2. Flujo turbulento del fluido corrosivo.
3. Grado de agresividad del fluido corrosivo.

Todo tipo de equipos expuestos a fluidos corrosivos en movimiento están sujetos a corrosión por erosión, tal es el caso de tubería principalmente en codos, tee,

válvulas, también en bombas, ventiladores, tubos en los intercambiadores de calor, alabes de turbinas, condensadores [37].

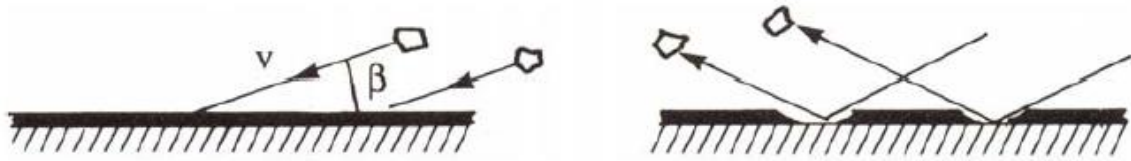


Figura 3.12. Corrosión por erosión [38].

3.4.3. Corrosión por fricción.

La corrosión por fricción es un fenómeno químico y mecánico combinado. La corrosión por fricción ocurre en la interface entre superficies metálicas en contacto y sumamente cargadas, cuando están sometidas a ligeros movimientos vibratorios relativos, estas superficies metálicas sumamente cargadas (altas presiones) deben estar en íntimo contacto, de tal modo que las vibraciones de interface produzcan martilleo o rozamiento de la superficie metálica; debe existir también un pequeño grado de deslizamiento de esta superficie. Ejemplos de este tipo de corrosión se observan en las chumaceras o cojinetes de rodillo, y de bola, las bielas las agujas, los acoplamientos y los ejes [39].

3.5. Ubicación geográfica, altitud, humedad.

3.5.1. Ubicación geográfica.

La Comunidad de Chazo Juan se encuentra ubicada en la Provincia Bolívar, Cantón Guaranda, Parroquia Salinas. A una altura aproximada de 1400 msnm con una presión aproximada de 920 milibares o 0,8882 atm, sus coordenadas UTM son 9845826,94 N y 706201,76 E.

3.5.2. Clima.

El clima de la región es subtropical con abundante vegetación y tiene una temperatura promedio que oscila entre los 18 a 27°C. El suelo comprende de una tierra arcillosa y su temperatura promedio varía entre los 4 a 6°C.

En las tablas que se presentan a continuación se muestran los datos de temperatura y humedad relativa promedio del medio donde se encuentra instalado el micro ingenio azucarero ASPROCA. Tomados con los instrumentos de medición de la Escuela de Ingeniería Mecánica “*el termo higrómetro y la termocupla.*”

TABLA 3.2. TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AMBIENTE.

| Fecha: sábado 5 de febrero del 2011 | | | | |
|-------------------------------------|-------|--------|--------|----------|
| N° de medición | hora | T (°C) | H R(%) | Clima |
| 1 | 15h00 | 31,1 | 62 | lluvioso |
| 2 | 16h00 | 25,5 | 82 | lluvioso |
| Promedio | | 28,3 | 72 | |

TABLA 3.3. TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AMBIENTE.

| Fecha: domingo 6 de febrero del 2011 | | | | |
|--------------------------------------|-------|--------|---------|-------|
| N°de medición | Hora | T (°C) | H R (%) | Clima |
| 1 | 08h00 | 24 | 78 | seco |
| 2 | 09h00 | 27,8 | 73 | seco |
| 3 | 10h00 | 26,1 | 71 | seco |
| Promedio | | 25,96 | 74 | |

TABLA 3.4 TEMPERATURA DEL SUELO.

| Nº DE MEDICIÓN | TEMP (°C) |
|-----------------------|------------------|
| 1 | 4 |
| 2 | 6 |
| 3 | 5 |
| 4 | 2 |
| 5 | 6 |
| Promedio | 4,6 |

3.6. Ensayos de corrosión.

Con los ensayos de corrosión se pretende explicar las causas del deterioro de un material bajo condiciones conocidas y reproducibles, lo que permitirá evaluar los factores decisivos del proceso corrosivo esto ayudará a determinar cuáles son o pueden ser, los métodos de protección más adecuados [40].

Factores que se relacionan con el metal:

- Composición química.
- Proceso de fabricación
- Presencia de impurezas
- Tratamientos térmicos o mecánicos
- Condiciones de superficie
- Otros.
- Factores que se relacionan con el medio:
 - Composición.
 - Concentración.
 - Gradientes de concentración

- Impurezas.
- pH.
- Humedad.
- Presencia de oxígeno.
- Temperatura.
- Presión.
- Sólidos en suspensión.
- Frecuencia de renovación del corrosivo.
- Otros.

3.6.1. Ensayos de campo.

Los ensayos de campo son aquellos en los cuales la pieza o probeta a ensayar está sometida directamente a las condiciones de ataque reales, o sea, está situada en el mismo sistema o medio que se quiere estudiar [40].

Dentro de los ensayos de campo se tiene fundamentalmente:

- Ensayos en la atmósfera.
- Ensayos en el Agua.
- Ensayos en el Suelo.

Ejemplos de ensayos de campo son las exposiciones atmosféricas de un gran número de probetas en colgaderos o perchas en una o más localizaciones geográficas y ensayos similares en suelos o en agua de mar. En estos ensayos intervienen gran cantidad de factores, así se tiene:

3.6.1.1. En la atmósfera.

La temperatura, la humedad, la composición del aire, el movimiento del aire, la irradiación solar, el polvo, la lluvia, el rocío, la humedad, la nieve, etc.

3.6.1.2. En el agua.

La aireación, el movimiento, la temperatura, la composición, el pH, las impurezas, organismos vivos, etc.

3.6.1.3. En el suelo.

La temperatura, la humedad, la resistividad, la composición, organismos vivos, pH, etc.

3.6.2. Procedimiento de ensayo.

Las etapas de un ensayo de corrosión son las siguientes:

3.6.2.1. Selección de materiales y probetas.

Es una importante etapa y puede ser comparada al cimiento de una casa. Si la información completa sobre los materiales no es conocida, los datos obtenidos pueden ser prácticamente inservibles. Composición química, historia de fabricación, historia metalúrgica e identificación positiva de las probetas son todo datos requeridos.

Cuando se trabaja con muestras que van a ser expuestas durante un período de tiempo determinado en determinadas condiciones, es siempre aconsejable realizar varios duplicados aunque sólo sea para evitar un posible mal resultado un mínimo de tres duplicados en una regla razonable [40].

3.6.2.2. Preparación de las probetas.

Es conveniente preparar la superficie de las muestras por las siguientes razones:

1. Para llegar a obtener el mismo tipo de superficie que se utilice en la práctica.
2. Para ayudar a detectar una corrosión ligera, cuando la superficie no permita hacerlo.
3. Para evitar en lo posible la contaminación.
4. Para obtener una superficie más uniforme en todas las muestras [40].

3.6.2.3. Selección de medio corrosivo.

En la investigación fundamental, la selección del medio se basa siempre en razones teóricas particulares, mientras que las pruebas prácticas se desarrollan en un medio de condiciones similares a las del servicio que se tiene en estudio, o en un medio similar creado en el laboratorio [40].

3.6.2.4. Ejecución del ensayo.

La apropiada selección del tiempo y número de periodos de exposición es importante, y resultados equivocados pueden ser obtenidos si estos factores no son considerados. Al menos dos periodos deben ser usados. Este procedimiento provee información sobre los cambios en la velocidad de corrosión con el tiempo y puede revelar errores de pesaje. La velocidad de corrosión puede incrementarse, decrecer o mantener constante con el tiempo. Muchas veces la velocidad inicial de ataque es alta y luego decrece [40].

3.6.3. Evaluación de los resultados de los ensayos de corrosión.

3.6.3.1 Método de estimación visual.

El examen visual macroscópico (valoración cualitativa) se realiza tanto con los productos de corrosión, o sin los productos de corrosión y posterior comparación con las fotografías patrones ASTM que establece los grados de corrosión (valoración cuantitativa). En él se establece una clasificación del área corroída que va desde el número cero al número 10, correspondiendo al número cero el mayor porcentaje de área corroída (ataque más fuerte de la corrosión) y el número 10 el menor porcentaje de área corroída (0% o sin ataque).

Cuando el examen macroscópico no es suficiente para indicar el progreso de la corrosión, se debe obtener información más detallada mediante la observación microscópica. El examen microscópico es necesario para valorar casos de corrosión localizada (corrosión intergranular, picado, etc.). Por regla general el picado se valora midiendo la profundidad de la picadura más profunda, o por medio de los factores de picado [41].

3.6.3.2. Métodos gravimétricos.

No se utilizan para valorar la corrosión por picado. Solamente para corrosión uniforme, el método más común es el de pérdida de peso.

El método gravimétrico se emplea normalmente para determinar el metal que queda después de la corrosión mediante la utilización de balanzas analíticas. Para utilizar el método de pérdida de peso, es necesario eliminar los productos de corrosión sin ejercer ningún efecto ulterior sobre el metal [41].

3.6.4. Valorización de efectos sobre el medio.

3.6.4.1. Métodos analíticos.

La valoración de la corrosión, por medio del análisis químico, puede hacerse determinando el contenido de metal del producto de corrosión o del medio, o de ambos; o determinando la variación de concentración de un constituyente del medio que sea esencial para el proceso de corrosión [41].

3.6.4.2. Medición electroquímica.

3.6.4.2.1. Medición de Potencial.

Para este fin se requiere de un dispositivo electrónico denominado **POTENCIOSTATO**. El fundamento general de este dispositivo y de los instrumentos correspondientes se basa en que la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo y un electrodo de referencia, se compara con un voltaje seleccionado en un Potenciómetro; la diferencia entre los dos se amplifica y se emplea para controlar la corriente aplicada a través de un electrodo auxiliar que minimiza esa diferencia [41].

3.7. Rata de corrosión.

La pérdida de peso en gramos (o miligramos) y el porcentaje de cambio del peso de los materiales después de la exposición al ambiente corrosivo son dos formas pobres expresar la resistencia a la corrosión. Es obvio que estas formas de expresar puede ser influenciadas por la duración de la exposición.

Desde el punto de vista de ingeniería, el porcentaje de penetración puede ser directamente usado para predecir la vida de un componente estructural dado. Por este motivo son importantes las formas siguientes:

- Pulgadas de penetración por año (ipy).
- Pulgadas de penetración por mes (ipm).
- Milímetros de penetración por año (mmpy).
- Milésimas de pulgada de penetración por año (mpy).

Expresan la resistencia a la corrosión directamente en términos de penetración. Desde el punto de vista de conveniencia, milésimas de pulgada de penetración por año es la preferida debido a que el porcentaje de corrosión de los materiales útiles prácticamente varía entre 1 y 200 mpy. Así, usando esta expresión, es posible presentar los datos de corrosión usando pequeños números decimales [42].

Así se tiene:

- $mpy < 1$ material excelente.
- mpy 1-5 muy bueno.
- mpy 5-20 bueno.
- mpy 20-50 regular.
- mpy 50-200 malo.
- $mpy > 200$ inaceptable.

En ingeniería de materiales, la resistencia a la corrosión no es el único factor a tomarse en cuenta para la selección de un material, sino que existen otros como son:

- Resistencia mecánica.
- Fabricabilidad.
- Costo.
- Disponibilidad.

- Apariencia.

3.8. Formula de la rata de corrosión o velocidad de penetración (C).

$$C = \frac{\text{Perdida de Peso(g)} \cdot K}{\text{Densidad de la Aleacion (g/cm}^3\text{)} \cdot \text{Area Expuesta (cm)} \cdot \text{Tiempo de Exposicion(hr)}}$$

C: Rata de corrosión

De otra manera se tiene:

$$C = K \cdot \frac{W}{D \cdot A \cdot t} \quad (3.2)$$

Dónde:

W es la pérdida de peso en mg

D es la densidad del material, en g/cm³

A es el área de exposición, en pulg.²

t es el tiempo de exposición en horas.

K constante es igual a 534 en mpy [42].

3.9. Causas de la oxidación y la corrosión.

3.9.1. Oxidación del hierro.

La oxidación es una reacción química donde un metal o un no metal ceden electrones, y por tanto aumenta su estado de oxidación. La reacción química opuesta a la oxidación se conoce como reducción, es decir cuando una especie química acepta electrones. Estas dos reacciones siempre se dan juntas, es decir, cuando una sustancia se oxida, siempre es por la acción de otra que se reduce. Una cede electrones y la otra los acepta. Por esta razón, se prefiere el término general de reacciones redox. El oxígeno es el mejor oxidante que existe debido a que la molécula es poco reactiva (por su doble enlace) y sin embargo es muy electronegativo, casi como el flúor.

Las sustancias oxidantes más usuales son el permanganato potásico (KMnO_4), el dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), el agua oxigenada (H_2O_2), el ácido nítrico (HNO_3) el hipoclorito sódico (NaClO) muy oxidante en medio alcalino y el bromato potásico (KBrO_3). El ozono (O_3) es un oxidante muy enérgico [43].

3.9.2. Tipos de oxidación.

3.9.2.1. Oxidación lenta.

Se produce casi siempre en los metales a causa del agua o aire, causando su corrosión y pérdida de brillo y otras propiedades características de los metales, desprendiendo cantidades de calor inapreciables; al fundir un metal se acelera la oxidación, pero el calor proviene principalmente de la fuente que derritió el metal y no del proceso químico (una excepción sería el aluminio en la soldadura autógena).

3.9.2.2. Oxidación rápida.

Se produce durante lo que ya sería la combustión, desprendiendo cantidades apreciables de calor, en forma de fuego, y ocurre principalmente en sustancias que contienen carbono e hidrógeno, (Hidrocarburos) [43].

3.9.3. Los factores de la corrosión.

Los factores de los cuales depende la corrosión, son muchísimos, por lo que resulta interesante crear una tabla de los mismos y pueden clasificarse en cuatro grupos principales:

TABLA 3.5. FACTORES DE CORROSIÓN [44].

| Factores que definen las formas de ataque | Factores Metalúrgicos | Factores que definen las condiciones de empleo | Factores que dependen del tiempo |
|---|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Concentración del reactivo • Contenido en oxígeno • pH del medio • adiciones de inhibidores • T (°C) • Presión | <ul style="list-style-type: none"> • Composición de la aleación • Procedimiento de elaboración • Impurezas • Tratamientos térmicos y mecánicos • Adiciones protectoras | <ul style="list-style-type: none"> • Estado de la superficie • Forma de las piezas • Solicitaciones mecánicas • Empleo de inhibidores • Características de las uniones | <ul style="list-style-type: none"> • Envejecimiento • Tensiones mecánicas • T° • Modificación de los revestimientos protectores |

Se debe considerar que estos diferentes factores no son totalmente independientes unos de otros, figurando algunos en varios grupos a la vez.

3.9.3.1. Concentración de reactivo.

La concentración del reactivo, puede aumentar o disminuir la rapidez de ataque a un metal dependiendo del caso, es decir, no hay una relación directa o una “ley general” que diga que a mayor o menor concentración, haya mayor o menor rapidez de ataque corrosivo al metal [44].

3.9.3.2. pH del medio.

Es un factor de gran importancia ya que de éste dependen muchas reacciones que intervienen en la corrosión, tanto química como electroquímica. Se han creado diagramas, los que son de gran utilidad para relacionar el pH del medio, con el potencial (en Volts) que afecta al metal, el cual puede ser inmune, corrosivo o susceptible a pasivarse [44].

3.9.3.3. Estado de superficie.

Debido a que la corrosión es el resultado de la acción de un líquido o de un gas sobre la superficie de un metal, es claro ver que la corrosión de la misma depende las características que esta posea.

Estas características se pueden clasificar en 4 grupos.

- Características Cristalográficas.
- Características Químicas.
- Características Fisicoquímicas.
- Características Micro geométricas [44].

3.9.4. Métodos de protección contra la corrosión y oxidación.

3.9.4.1. Protección contra la corrosión.

La corrosión se puede controlar o prevenir por medio de diferentes métodos, aunque a veces resulta más económico cambiar la pieza corroída cada cierto tiempo que aplicarle alguno de los métodos de protección.

Los métodos para controlar la corrosión son: selección de materiales, recubrimientos, diseño, alteración del entorno, protección catódica y protección anódica [45]

3.9.4.2. Selección de materiales.

Consiste en elegir un material lo suficientemente resistente a la corrosión, en la condición a la que va a ser utilizado. Ej. Aceros inoxidables o algunos materiales cerámicos [45]

3.9.4.3. Recubrimientos.

Se puede controlar la corrosión dotando a los materiales de un recubrimiento adecuado. Pueden ser recubrimientos metálicos, orgánicos o inorgánicos.

Los metálicos se aplican en finas capas sobre piezas metálicas, de forma que las aíslan del ambiente corrosivo. En algunas ocasiones estos recubrimientos sirven de ánodos de sacrificio, y se corroen en vez del metal al que protegen. Ej. Acero galvanizado, que es acero recubierto con una fina capa de zinc. El zinc se corroe evitando el deterioro del acero, ya que el zinc es más electronegativo.

Los inorgánicos se usan para proteger al acero de la corrosión mediante una fina capa de vidrio fundido, que le proporciona además un acabado duradero. Este acero vidriado se utiliza para la industria química

En los inorgánicos, los materiales se recubren con pinturas, barnices, lacas, y otras sustancias con el fin de proteger de la corrosión [45].

3.9.4.4. Diseño.

Para reducir los problemas de corrosión se pueden establecer ciertas normas de diseño:

- Para prevenir la corrosión por grietas es preferible la unión por soldadura a los remaches.
- No se deben diseñar ángulos pronunciados en tuberías donde circulen líquidos a gran velocidad para evitar la corrosión.
- Los tanques destinados a albergar sustancias corrosivas deben estar provistos de un sistema de desagüe que permita su limpieza.
- Los elementos sometidos a condiciones extremas de corrosión estar situados de forma que se puedan limpiar y sustituir de forma rápida y sencilla [45]

3.9.4.5. Alteración del entorno.

La corrosión es un ataque químico por parte del medio, de forma que cualquier modificación de este, repercutirá en la forma en la que se realiza la corrosión. Con objeto de reducirla se pueden citar las siguientes normas:

- Una disminución de la temperatura implicara la reducción de la velocidad de corrosión. Sin embargo hay algunas excepciones como el agua de mar, que es más corrosiva a menor temperatura.

- Si la velocidad del fluido corrosivo disminuye, se reduce la corrosión por erosión. Aunque otras veces hay que evitar las disoluciones estancas.
- Cuando los recipientes que contienen fluidos corrosivos han de ser totalmente cerrados, se añaden inhibidores para reducir la corrosión. Hay inhibidores de tipo absorción, que son absorbidos por la superficie del recipiente creando un recubrimiento protector, o de tipo desoxidante, que reaccionan con el oxígeno eliminándolo [45].

3.9.4.6. Protección catódica.

En el cátodo de una pila se da una reacción de reducción, de forma que si se convierte a la pieza que se quiere proteger en un cátodo, no sufrirá corrosión. (Se da suministrándole e^- electrones).

El suministro de e^- (electrones) se puede hacer por corriente impresa, uniendo la pieza al polo negativo de una fuente de corriente continua externa y el polo positivo se conecta a un ánodo consumible (chatarra), o por ánodo de sacrificio.

3.9.4.7. Protección anódica.

Consiste en la formación de películas protectoras en la superficie de los metales de igual modo que en la oxidación se forman películas de óxido auto protectoras de forma natural. No se conocen con claridad los mecanismos de formación de estas películas, pero mediante un tratamiento adecuado se puede provocar su aparición en algunos metales [45].

CAPÍTULO IV

4. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS.

4.1. Metales y sus aleaciones.

En la tierra existe una infinidad de materiales y el hombre a través del tiempo durante su evolución y desarrollo tecnológico ha sabido aprovecharlos en su gran mayoría, desde las rocas hasta los materiales más preciosos entre estos tenemos los metales como el oro la plata el cobre, pero sin duda alguna es el hierro el metal que principalmente ha sido explotado a partir de la revolución Industrial gracias a su abundancia encontrándose como óxido de hierro FeO , al tener mejores propiedades químicas y mecánicas frente a los demás metales.

Las aleaciones pueden dividirse en dos tipos las ferrosas y no ferrosas. Las aleaciones ferrosas tienen al hierro como su principal metal de aleación, mientras que las aleaciones no ferrosas tienen metales distintos del hierro. Los aceros que son aleaciones ferrosas, son las más importantes principalmente por su costo relativamente bajo y la variedad de aplicaciones por sus propiedades mecánicas. Los elementos de aleación tales como el níquel, cromo y molibdeno se añaden a los aceros al carbono para producir aceros de baja aleación. Los aceros de baja aleación presentan buena combinación de alta resistencia y tenacidad.

Los aceros inoxidable son las aleaciones ferrosas más importantes a causa de su alta resistencia a la corrosión en medios oxidantes, para ser un acero inoxidable debe contener al menos 12% de cromo.

Los hierros para fundición son otra familia industrialmente importante de las aleaciones ferrosas. Son de bajo costo y tienen propiedades especiales tales como una buena moldeabilidad, resistencia a la corrosión, al choque térmico, al desgaste y durabilidad.

Las aleaciones no ferrosas son las que contienen aluminio, cobre, magnesio, titanio y níquel. Las aleaciones de magnesio son muy ligeras y tienen aplicaciones aeroespaciales. Las aleaciones de titanio son caras, pero tienen una combinación de resistencia y ligereza que no es asequible para cualquier otro sistema de aleación y por esta razón se usan ampliamente en las piezas estructurales de los aviones. Las

aleaciones de níquel presentan una gran resistencia a la corrosión y oxidación y son por tanto son usadas comúnmente en los procesos industriales químicos y de petróleos [46].

4.2. Clasificación de los aceros.

Se denomina acero a toda aleación hierro carbono forjable cuyo contenido de carbono esta generalmente comprendido entre 0,10 y 1,76. Los aceros se clasifican atendiendo a varios criterios [46].

4.2.1. Clasificación de los aceros atendiendo a su procedimiento de fabricación.

Según el procedimiento de fabricación se tiene aceros Bessemer, aceros Siemens o aceros eléctricos [46].

4.2.2. Clasificación de los aceros atendiendo el porcentaje de carbono.

Según el punto eutectoide los aceros se clasifican en hipoeutectoides cuyo porcentaje de carbono es inferior al punto eutectoide y tienen una matriz ferrítica, siendo dúctiles y tenaces. Aceros eutectoides si su porcentaje de carbono es igual al punto eutectoide, hipereutectoides si su porcentaje de carbono es superior al punto eutectoide. Tienen una matriz de cementita, por lo que es duro y frágil, como se puede observar en el Diagrama Hierro Carbono [46].

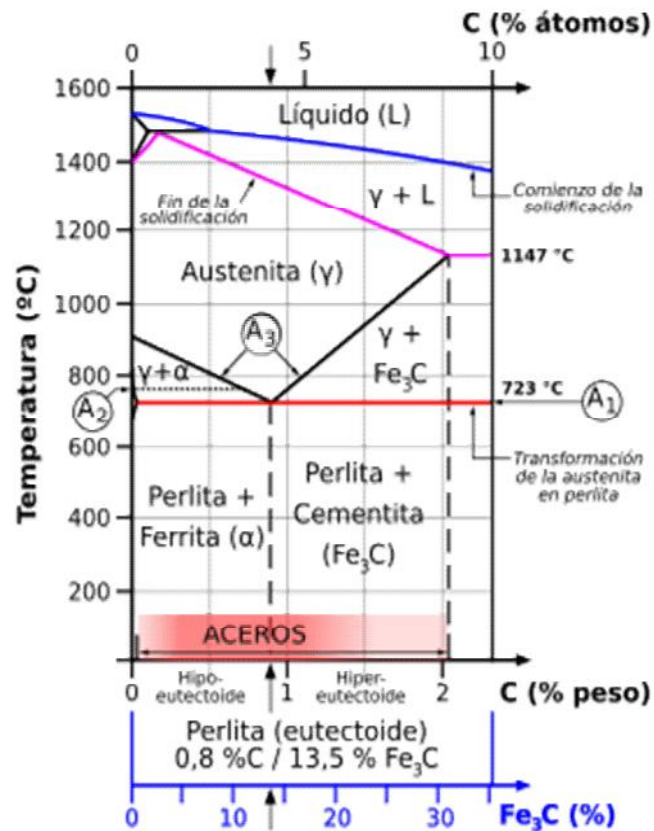


Figura 4.1. Diagrama Hierro Carbono [47].

4.2.3. Clasificación de los aceros atendiendo a su constitución.

Los aceros atendiendo a su constitución se clasifican en:

- Los aceros perlíticos se caracterizan por estar constituidos a la temperatura ambiente después de un enfriamiento normal desde el estado austenítico por perlita y ferrita o perlita y cementita dependen de si se encuentran por debajo o por encima del punto eutectoide.
- Los aceros martensíticos están constituidos en su mayor parte por martensita después del enfriamiento al aire desde su estado austenítico. En realidad se trata de aceros perlíticos cuando la velocidad de temple es muy lenta quedando templados por enfriamiento al aire.
- Los aceros austeníticos son los que enfriados desde elevada temperatura generalmente superior a los 900°C quedan constituidos en su mayor parte por

austenita a la temperatura ambiente. Pertenecen a este grupo los aceros cromo níquel, inoxidable de 18% de cromo.

- Los aceros ferríticos son los que están formados principalmente por ferrita a cualquier temperatura, estos aceros no pueden ser templados porque no alcanzan el estado austenítico por calentamiento ni tampoco el estado martensítico por enfriamiento [48].

4.3. Aceros inoxidables.

Las propiedades de los aceros inoxidables son influenciadas significativamente por su composición química, la que a su vez determina las características microestructurales de estas aleaciones. En la actualidad, los aceros inoxidables se pueden clasificar en forma general en cuatro grandes familias:

- Los aceros inoxidables ferríticos.
- Los aceros inoxidables austeníticos.
- Los aceros inoxidables martensíticos.
- Los aceros inoxidables austenoferríticos (dúplex).

Además de estos, existen otros nuevos tipos de aceros inoxidables como los aceros inoxidables endurecibles ferrítico-martensíticos [49].

4.3.1. Aceros inoxidables ferríticos.

Este tipo de aleaciones tienen contenidos de Cr entre 12 y 29% y muy bajos contenidos de Ni (<2%). Reciben su nombre debido a que su microestructura está constituida completamente por ferrita. Los aceros inoxidables ferríticos son magnéticos, tienen una buena ductilidad y son resistentes a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas. Este tipo de aceros inoxidables son los más económicos debido a su bajo contenido de Ni. Sin embargo, las ventajas económicas que se derivan de ello no se pueden aprovechar debido a la dificultad de elaborar productos de gran espesor y problemas de soldabilidad.

El acero inoxidable tipo AISI 430 es el más representativo de este grupo, tiene aproximadamente 17% Cr y es considerado como una aleación multipropósito para aplicaciones en las cuales las exigencias de resistencia a la corrosión, especialmente en las uniones soldadas, no sean importantes. El acero inoxidable del tipo AISI 444 (18% Cr 2% Mo) posee una mejor resistencia a la corrosión por picaduras y por resquicios, equivalente al acero inoxidable austenítico del tipo AISI 316 [49].

4.3.2. Aceros inoxidables austeníticos.

Son aleaciones no magnéticas endurecibles por conformado en frío. Su microestructura está constituida fundamentalmente por granos de austenita. La presencia de Ni en estos aceros permite estabilizar la fase austenítica, pues de otro modo la adición única de Cr produciría una micro estructura ferrítica a temperatura ambiente.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una excelente resistencia a la corrosión, muy buena conformabilidad y en términos generales son fácilmente soldables (mejor que los ferríticos).

El acero inoxidable del tipo AISI 304 (19% Cr – 10% Ni) es el más representativo de este grupo de aleaciones. Posee una buena resistencia a la corrosión atmosférica y se lo emplea en forma significativa en la industria química, alimentaria y médica. Cuando las condiciones de servicio exigen una mayor resistencia a la corrosión por picaduras se emplea el acero inoxidable del tipo AISI 316 (17% Cr – 12% Ni – 2% Mo) que es empleado mayormente en procesos industriales como la elaboración del papel y en la industria alimentaria [49].

4.3.3. Aceros inoxidables martensíticos.

Son aleaciones que tienen una estructura austenítica a elevadas temperaturas y que puede ser transformada a martensita después de un tratamiento térmico de temple, elevando su dureza y resistencia al desgaste. El contenido de carbono de estas aleaciones varía en un amplio rango (entre 0,15 % y 1% C), mientras que el contenido de Cr suele oscilar entre el 12% y 18%. Los aceros inoxidables de bajo contenido de carbono (0,15% C) están asociados a un menor contenido de Cr en el acero, debido a que éste tiende a estabilizar la ferrita a elevadas temperaturas, lo que impide al acero sufrir la transformación martensítica después del temple. Todos los aceros inoxidables

martensíticos pueden ser templados y revenidos y la dureza alcanzada dependerá del contenido de carbono de la aleación. Los aceros inoxidable martensíticos de alto contenido de carbono ($>0,2\%$ C) son empleados como acero para cuchillería (tipos AISI 420 y AISI 440). Las aleaciones de mayor contenido de C exhiben una menor resistencia a la corrosión en condición de temple y revenido. En términos generales se pueden decir que los aceros inoxidable martensíticos presentan una menor resistencia a la corrosión que las demás familias de aceros inoxidable, pero tienen una resistencia mecánica elevada [49].

4.3.4. Aceros inoxidable dúplex.

Estos aceros inoxidable no son precisamente nuevas aleaciones, pues fueron producidas por primera vez hace más de 60 años. Sin embargo, los primeros aceros inoxidable dúplex presentaron una serie de inconvenientes. El empleo del N como elemento de aleación revolucionó el desarrollo de estas aleaciones y permitió la aparición de la segunda generación de aceros inoxidable, el más representativo es sin lugar a dudas el acero inoxidable del tipo 22% Cr-5% Ni. Estas aleaciones son muy resistentes a la corrosión por picaduras inducida por cloruros. Los aceros inoxidable dúplex están constituidos microestructuralmente por dos fases: ferrita y austenita.

Estos materiales tienen la ventaja adicional de tener una elevada resistencia mecánica lo que puede representar en muchos casos un ahorro significativo en costos de material. Un ejemplo de ello es la aplicación de estos materiales en la fabricación de tanques de almacenamiento para buques de carga.

Otro campo de aplicación importante es la industria alimentaria donde los aceros inoxidable dúplex del tipo 2304 y 2205 pueden reemplazar ventajosamente a los aceros inoxidable del tipo 304L y 316L, reduciendo el riesgo de CBT y de contaminación del proceso productivo.

La Tabla 4.1, muestra la composición química de algunos de los aceros inoxidable de mayor empleo en la industria [49].

TABLA 4.2. DISTINTOS TIPOS DE ACEROS [49].

| AISI | UNS | %C | %Mn | %Si | %Cr | %Ni | %P | %S | Otros |
|---|--------|-------|------|-----|------|-----|-------|-------|------------------------|
| ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS | | | | | | | | | |
| 405 | S40500 | 0,08 | 1 | 1 | 13 | -- | 0,04 | 0,03 | 0,2 Al |
| 430 | S43000 | 0,12 | 1 | 1 | 17 | -- | 0,04 | 0,03 | -- |
| 434 | S43000 | 0,12 | 1,25 | 1 | 17 | -- | 0,04 | 0,03 | 1,0 Mn |
| 446 | S44600 | 0,2 | 1,5 | 1 | 25 | -- | 0,04 | 0,03 | 0,25 N |
| 18SR | | 0,004 | 0,3 | 1 | 18 | -- | -- | -- | 2,0 Al, 0,4 Ti |
| Al 29-4 2 | S44800 | 0,01 | 0,3 | 0,2 | 29 | 2,2 | 0,025 | 0,02 | 3,8 Mo |
| ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS | | | | | | | | | |
| 303 | S30300 | 0,15 | 2 | 1 | 18 | 9 | 0,2 | >0,15 | 0,06 Mo |
| 304 | S30400 | 0,08 | 2 | 1 | 19 | 9,2 | 0,045 | 0,03 | -- |
| 316 | S31600 | 0,08 | 2 | 1 | 17 | 12 | 0,045 | 0,03 | 2,0Mo |
| 317 | S31700 | 0,08 | 2 | 1 | 19 | 13 | 0,045 | 0,03 | 3,5Mo |
| 321 | S32100 | 0,08 | 2 | 1 | 19 | 14 | 0,045 | 0,03 | Ti=5xC min |
| 347 | S34700 | 0,08 | 2 | 1 | 18 | 11 | 0,045 | 0,03 | Cb+Ta=10xC min |
| 20 Mo6 | | 0,03 | 1 | 0,8 | 24 | 35 | 0,03 | 0,03 | 5,7 Mo,3C u |
| 254 Smo | S31254 | 0,03 | 1 | 0,8 | 20 | 18 | 0,03 | 0,01 | 6,2Mo 9,7Cu 0,2N |
| ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS | | | | | | | | | |
| 403 | S40300 | 0,15 | 1 | 0,5 | 12,2 | | 0,04 | 0,03 | |
| 410 | S41000 | 0,15 | 1 | 1 | 12,2 | | 0,04 | 0,03 | |
| 416 | S41600 | 0,15 | 1,25 | 1 | 13 | -- | 0,04 | 0,03 | 0,6Mo |
| 431 | S43100 | 0,2 | 1 | 1 | 16 | 1,9 | 0,04 | 0,03 | - |
| 440A | S44002 | 0,67 | 1 | 1 | 17 | -- | 0,04 | 0,03 | 0,75 Mo |
| 416 PLUS | S41610 | 0,15 | 1 | 1 | 13 | -- | 0,06 | >0,15 | 0,6Mo |

4.3.5. Aceros inoxidables endurecidos por precipitación.

Son aceros inoxidables del Cr - Ni que contienen adicionalmente otros elementos de aleación como el Cu y Al que favorecen la precipitación de fases secundarias y elevan significativamente la dureza y resistencia mecánica del material cuando es sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento. Estos materiales

ofrecen una alternativa para obtener una buena resistencia mecánica por medio de un tratamiento térmico a menor temperatura que puede ser aplicado incluso después de la fabricación de la pieza o elemento mecánico.

Las propiedades mecánicas (resistencia y dureza) que se pueden alcanzar con estas aleaciones son superiores inclusive a las obtenidas por los aceros inoxidable martensíticos (aprox. 1480 Mpa). De la misma forma, debido a que el contenido de Cr es mayor que en estos últimos la resistencia a la corrosión resulta también ser superior. Los aceros inoxidable endurecibles por precipitación pueden ser del tipo martensítico, semi-austeníticos y austeníticos. La tabla 4.2 muestra algunos tipos de aceros inoxidable endurecibles por precipitación [49].

TABLA 4.3. DISTINTOS TIPOS DE ACERO ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN [49].

| AISI | NOMBRE COMERCIAL AL | % C | % Cr | % Ni | Otros |
|--------------------------|---------------------|------|------|------|--|
| MARTENSITICOS | | | | | |
| 635 | Stainless W | 0,07 | 16,5 | 6,8 | 0,5 Mn/0,5 Si/0,4 Al/0,8Ti |
| 630 | 17 - 4 PH | 0,04 | 16,0 | 4,0 | 0,25 Mn/0,6 Si/3,2 Cu/0,25 (Cb+Ta) |
| ---- | 15 - 5 PH | 0,07 | 15,0 | 4,0 | 4,0 Cu/0,35 (Cb+Ta) |
| SEMI-AUSTENITICOS | | | | | |
| 631 | 17 - 7 PH | 0,07 | 17,0 | 7,0 | 0,6 Mn/1,15 Al |
| 632 | PH 15 - 7 Mo | 0,07 | 15,0 | 7,0 | 2,20 Mo/1,15Al |
| 633 | AM -350 | 0,10 | 16,5 | 4,3 | 2,75 Mo/0,10N |
| 600 | A286 | 0,08 | 15 | 26 | 1,3 Mo/0,3V/2,0Ti/0,35 Al/0,003B/0,4Si |
| ---- | 17 -10 P | 0,12 | 17,0 | 10,0 | 0,75 Mn/0,6 Si/0,25 P |
| ---- | 17 -14 CuMo | 0,12 | 16,0 | 14,0 | 3,0Cu/2,5Mo/0,5 Cb, 0,25Ti/0,50Si/0,75Mn |

4.4. Clases de tratamientos.

4.4.1. Tratamientos.

Son los procesos a los que se somete los metales y aleaciones ya sea para modificar su estructura, cambiar la forma y tamaño de sus granos o bien por transformación de sus constituyentes.

El objeto de los tratamientos es mejorar las propiedades mecánicas, o adaptarlas, dándole características especiales a las aplicaciones que se le van a dar a las piezas de esta manera se obtiene un aumento de dureza y resistencia mecánica, así como mayor plasticidad o maquinabilidad para facilitar su conformación..

Los tratamientos térmicos fundamentales aplicados a los aceros son: normalizado, recocido, temple, revenido [50].

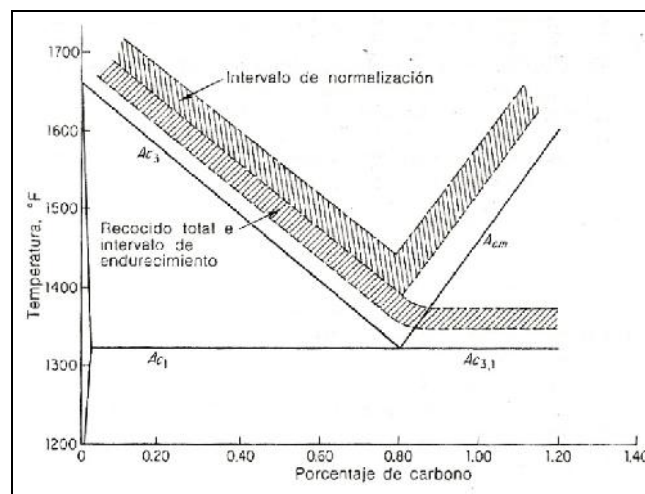


Figura 4.4. Intervalo de recocido, normalización y endurecimiento para aceros al carbono [51].

4.4.1.1. Normalizado.

Consiste el normalizado en calentar el acero a una temperatura de 38°C superior a la crítica (A_{cm}), y una vez que haya pasado todo el metal al estado austenítico, se deja enfriar al aire tranquilo hasta la temperatura ambiente como se muestra en la figura.

Se diferencia el normalizado, del recocido de regeneración y del temple, que el enfriamiento es mucho más lento en el recocido (dentro del horno) y mucho más rápido en temple (en agua, etc.).

El objetivo del normalizado es volver el acero más duro y más fuerte que el obtenido por recocido total, de manera que para algunas aplicaciones la normalización se convierte en un tratamiento térmico final. Para aceros hipereutectoides es necesario calentar el acero por encima de la línea crítica superior con el fin de refinar la red de cementita. El normalizado también puede utilizarse para mejorar la maquinabilidad, modificar y refinar el grano y homogenizar la micro estructura para mejorar las respuestas de endurecimiento.

Se emplea casi exclusivamente para aceros al carbono de baja aleación 0,15 a 0,5% de C. El resultado de este tratamiento depende del espesor de las piezas, debido a que las velocidades de enfriamiento son mayores en las piezas delgadas que en las piezas [51].

4.4.1.2. Recocido total.

Consiste en calentar el acero a la temperatura adecuada y luego enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación en el horno o en algún equipo que tenga un material que sea un buen aislante de calor continuando el enfriamiento hasta temperaturas más bajas. El objetivo del recocido es refinar el grano, proporcionar suavidad, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas y en algunos casos mejorar el maquinado.

El refinamiento del tamaño de grano por recocido de un acero hipoeutectoide se lo hace calentándolo aproximadamente 10°C por encima de la línea crítica superior Ac_3 . El enfriamiento en el horno dará lugar a pequeños granos de ferrita pro eutectoide y pequeñas áreas de perlita gruesa laminar.

El refinamiento del tamaño de grano de acero hipereutectoide tendrá lugar a unos 10°C por encima de la línea crítica inferior (A_{31}) [52].

4.4.1.3. Recocido de esferoidización.

Este tratamiento se utiliza cuando se trabaja con aceros hipereutectoides con una microestructura de perlita y una red de cementita obteniéndose aceros con una maquinabilidad deficiente, el objetivo del recocido de esferoidización es proporcionarle a los aceros de alto carbono una mínima dureza y una máxima ductilidad o una máxima maquinabilidad. Los aceros de bajo contenido de carbono rara vez se esferoidizan por que en la condición esferoidizada son excesivamente suaves [52].

4.4.1.4. Recocido para eliminación de esfuerzos.

Este proceso, algunas veces llamado recocido sub crítico es útil para eliminar esfuerzos residuales debido a un fuerte maquinado u otros procesos de trabajo en frío.

Generalmente se calienta el acero por debajo de la línea crítica inferior (281 a 343°C) [54].

4.4.1.5. Recocido de procesos.

Este tratamiento térmico se utiliza en las industrias de lámina y alambre y se lleva a cabo al calentar el acero a una temperatura por debajo de la línea crítica inferior (281 a 359 °C). Se aplica después del trabajado en frío y suaviza el acero, mediante recristalización, para un trabajo posterior [52].

4.4.1.6. Temple.

Consiste en el calentamiento de algunas aleaciones seguido de un enfriamiento rápido para impedir la transformación normal del constituyente obtenido en el calentamiento.

Existen dos clases de temple: el temple estructural o martensítico y el temple de precipitación [50].

4.4.1.6.1. Temple estructural o martensítico.

Se aplica frecuentemente a los aceros y consiste en un calentamiento hasta la zona austenítica, seguido de un enfriamiento rápido, para obtener martensita, que es una solución sólida sobresaturada en carbono de hierro alfa tetragonal.

La martensita es una fase que se origina en la transformación sin difusión y tiene lugar casi instantáneamente. Esta transformación se da en otras aleaciones no férricas, siendo su principal característica la transformación sin difusión. El objeto del temple es aumentar la dureza y la resistencia mecánica [50].

4.4.1.6.2. Temple de precipitación.

Se aplica principalmente a algunas aleaciones de Al, Mg y Cu. Estas se denominan así porque el endurecimiento se produce por la precipitación de un compuesto químico o solución sólida.

Mientras que en el temple anterior el endurecimiento era instantáneo, en el temple de precipitación la aleación va endureciéndose después del enfriamiento de forma progresiva. Muchas veces, es necesario acelerar el endurecimiento por calentamiento. Este comportamiento distinto se debe a que el constituyente obtenido al final del enfriamiento es el mismo que se había obtenido en el calentamiento ya que no se ha tenido tiempo para que se realice la transformación debido a una velocidad de enfriamiento alta. Es después del enfriamiento cuando la aleación se va endureciendo por la precipitación progresiva del compuesto. La causa del endurecimiento por temple de precipitación estriba en que las partículas finas de precipitado constituyan obstáculos que se oponen al movimiento de dislocaciones [50].

4.4.1.7. Revenido.

Es un tratamiento complementario del temple, que generalmente sigue a éste. Al conjunto de los dos tratamientos también se le denomina "bonificado".

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

Cuando se pretenden los dos objetivos, se recurre al doble revenido, el primero con enfriamiento rápido y el segundo con enfriamiento lento hasta 300°C.

Los fines que se consiguen con este tratamiento son los siguientes:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad.
- Disminuir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple.
- Modificar las características mecánicas, en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos:
- Disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza.
- Aumentar las características de ductilidad; alargamiento estricción y las de tenacidad; resiliencia.

Los factores que influyen en el revenido son los siguientes: la temperatura de revenido sobre las características mecánicas, el tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido), la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25mm de espesor o diámetro)[53].

4.4.2. Tratamientos superficiales.

La mayoría de las aplicaciones industriales requieren una superficie dura resistente al desgaste llamada capa o región superficial, y una relativamente suave y tenaz en su interior, llamada parte interna. Existen algunos métodos de tratamiento térmico superficial.

- Carburización
- Nitruración
- Cianuración o carbonitruración
- Endurecimiento por flama

- Endurecimiento por inducción

Los tres primeros métodos cambian la composición química, la carburización por la adición de carbono, la nitruración por la adición de nitrógeno y la cianuración por la adición de carbono y de nitrógeno. Los dos últimos no cambian la composición química del acero y son métodos de endurecimiento poco profundo [54].

4.5. Recubrimiento Metálico.

4.5.1. Galvanizado.

La galvanización en caliente es uno de los sistemas más eficaces de protección del hierro y el acero frente a la corrosión que experimentan estos materiales cuando se exponen a la atmósfera, las aguas y los suelos.

Consiste en la formación de un recubrimiento de zinc sobre las piezas y productos de hierro o acero mediante inmersión de los mismos en un baño de zinc fundido a 450°C.

La inmersión consiste en sumergir la pieza que se desea proteger, durante un poco tiempo en un metal protector fundido. Al salir la pieza se somete a un enjuague lo que uniformiza y disminuye la capa del metal adherido.

La reacción de galvanización solamente se produce si las superficies de los materiales están químicamente limpias, por lo que éstos deben someterse previamente a un proceso de preparación superficial.

Durante la inmersión en el zinc fundido, se produce una reacción de difusión entre el zinc y el acero, que tiene como resultado la formación de diferentes capas de aleaciones zinc-hierro. Al extraer los materiales del baño de zinc, estas capas de aleación quedan cubiertas por una capa externa de zinc puro. El resultado es un recubrimiento de zinc unido metalúrgicamente al acero base mediante diferentes capas de aleaciones zinc-hierro.

Desde el punto de vista industrial se distinguen tres tipos principales de instalaciones o procedimientos de galvanización:

- Procedimientos discontinuos
- Procedimientos automáticos o semiautomáticos
- Procedimientos continuos [55]

4.5.1.1. Propiedades.

Los recubrimientos que se obtienen por galvanización en caliente están constituidos por varias capas de aleaciones zinc-hierro, fundamentalmente tres, que se denominan "gamma", "delta" y "zeta" y una capa externa de zinc prácticamente puro (fase "eta"), que se forma al solidificar el zinc arrastrado del baño y que confiere al recubrimiento su aspecto característico gris metálico brillante.

Al ser recubrimientos obtenidos por inmersión en zinc fundido, cubren la totalidad de la superficie de las piezas, tanto las exteriores como las interiores de las partes huecas así como otras muchas áreas superficiales de las piezas que no son accesibles para otros métodos de protección [55].

4.5.1.2. Resistencia a la abrasión.

Los recubrimientos galvanizados poseen la característica casi única de estar unidos metalúrgicamente al acero base, por lo que poseen una excelente adherencia. Por otra parte, al estar constituidos por varias capas de aleaciones zinc-hierro, más duras incluso que el acero, y por una capa externa de zinc que es más blanda, forman un sistema muy resistente a los golpes y a la abrasión.

4.5.1.3. Resistencia a la corrosión.

Los recubrimientos galvanizados proporcionan al acero una protección triple.

- Protección por efecto barrera.

Aislándole del medio ambiente agresivo.

- Protección catódica o de sacrificio.

El zinc constituirá la parte anódica de las pilas de corrosión que puedan formarse y se irá consumiendo lentamente para proporcionar protección al acero. Mientras exista

recubrimiento de zinc sobre la superficie del acero, éste no sufrirá ataque corrosivo alguno.

- Restauración de zonas desnudas.

Los productos de corrosión del zinc, que son insolubles, compactos y adherentes, taponan las pequeñas discontinuidades que puedan producirse en el recubrimiento por causa de la corrosión o por daños mecánicos (golpes, arañazos, etc.).

4.5.1.4. Corrosión atmosférica.

La duración de la protección que proporcionan los recubrimientos galvanizados frente a la corrosión atmosférica es extremadamente alta y depende de las condiciones climatológicas del lugar y de la presencia en la atmósfera de contaminantes agresivos, como son los óxidos de azufre (originados por actividades urbanas o industriales) y los cloruros (normalmente presentes en las zonas costeras).

4.5.1.5. Corrosión en agua dulce.

El acero galvanizado resiste generalmente bien la acción corrosiva de las aguas naturales, ya que el anhídrido carbónico y las sales cálcicas y magnésicas que normalmente llevan en disolución estas aguas ayudan a la formación de las capas de pasivación del zinc, que son inertes e insolubles y aíslan al recubrimiento de zinc del subsiguiente contacto con el agua.

4.5.1.6. Corrosión en agua de mar.

Los recubrimientos galvanizados resisten bastante bien el ataque corrosivo del agua de mar. Ello se debe a que los iones Mg y Ca presentes en este agua inhiben la acción corrosiva de los iones cloruro y favorecen la formación de capas protectoras.

4.5.1.7. Ventajas.

Las principales ventajas de los recubrimientos galvanizados en caliente pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Duración excepcional.
- Resistencia mecánica elevada.

- Protección integral de las piezas (interior y exteriormente).
- Triple protección: barrera física, protección electroquímica y autocurado.
- Ausencia de mantenimiento.
- Fácil de pintar.

4.6. Alternativas.

4.6.1. Aceros al carbono y de baja aleación termotratables.

Los aceros al carbono y de baja aleación termotratables, se seleccionan por su endurecimiento y se utilizan principalmente en la condición de templado (endurecido) y revenido. En estos aceros, el contenido de carbono y el contenido de martensita en la estructura desempeñan papeles importantes en el procedimiento de selección. En estos aceros se han observado las correlaciones empíricas siguientes:

1. La dureza del acero templado depende solo del contenido de carbono y del porcentaje de martensita. El contenido de aleantes del acero no influye en la dureza del material templado.
2. El contenido de aleantes aumenta el endurecimiento del acero (se forma martensita o el acero se endurece a una profundidad mayor respecto a la superficie).
3. La estructura templada y revenida presenta la mejor combinación de propiedades de resistencia y tenacidad.
4. Debido a que el límite de fatiga es aproximadamente la mitad del esfuerzo máximo de fluencia, los límites de fatiga de estos aceros también guardan relación con la dureza. Para fatiga podría ser necesario pedir desulfuración o refinación en vacío de la colada líquida, ya que los aceros “más limpios” se comportan aún mejor.

La elección de cualquier aplicación de aceros termotratables debe partir del contenido más bajo posible de carbono y de aleantes para producir la dureza deseada en determinados puntos de las secciones. Cuanto mayor es el contenido de carbono, tanto mayores son los esfuerzos de fluencia y esfuerzo máximo de fluencia que se obtienen en la condición ya sea de laminado o de templado y revenido. Sin embargo, los contenidos

elevados de carbono (de más de 35% de C) tienen una tendencia más pronunciada al agrietamiento por templeado y dificultan la fabricación de las piezas por soldadura. En términos generales, los usos principales de los aceros con diversos niveles de carbono son los siguientes:

- El acero con no más del 0.20% de C es muy satisfactorio en aplicaciones de soldadura o cuando se requiere la máxima tenacidad.
- Con 0.30% de C es idóneo con una combinación de dureza (para desgaste) y tenacidad. Las puntas de escarificador y los cortafríos son dos aplicaciones típicas.
- Con 0.40% de C se utiliza en general para aplicaciones de alta resistencia mecánica.
- Con 0.50% de C es el mejor para aplicaciones de alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste.
- Con 0.60% de C goza de aceptación para resortes térmicamente tratados.
- Con más de 0.60% de C se destina a aplicaciones especiales, como herramientas y guíaderas de cojinete.

La selección con base en el endurecimiento puede llevarse a cabo con arreglo ya sea al por ciento de martensita presente en diferentes puntos de la sección a la dureza en los distintos lugares de la sección de los aceros. Tanto el por ciento de martensita como la dureza guardan relación con el esfuerzo máximo de fluencia del acero. Para tensión, corte y fatiga puros, la microestructura que se requiere es martensita al 99.9% templeada y revenida, o bien se debe endurecer totalmente a fondo la sección.

Aunque se pueden seleccionar los aceros con base en la cantidad de martensita formada, un método más común se basa en la resistencia de una dureza determinada en cierto punto de la sección o pieza [57].

4.6.2. Aceros Inoxidables.

La selección de aceros inoxidables se basa principalmente en la resistencia a la corrosión y, en segundo término, en las propiedades mecánicas. Otros factores pueden ser considerados para usos específicos. Con base en la corrosión, las formas más serias contra las que es necesario precaverse son las de tipo localizado que pueden causar

fallas inesperadas y a veces catastróficas, en tanto la mayor parte de la estructura aparece sin defectos. Algunas de estas formas son el ACE (agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo), la corrosión de hendidura, la picadura y el ataque intergranular en materiales sensitizados.

Por regla general, el procedimiento de selección se inicia con el tipo básico 304 (S30400), el acero inoxidable de uso más común. El tipo 304 tiene buena resistencia a la corrosión y resiste casi todos los ácidos oxidantes, muchas soluciones esterilizadoras, la mayor parte de los compuestos químicos orgánicos y colorantes, y una amplia variedad de compuestos químicos inorgánicos. Para procesos industriales que requieren un nivel más alto de corrosión, conviene considerar los tipos 316 (S31600) y 317 (S31700). Estas calidades contienen molibdeno, el cual incrementa su resistencia contra la picadura en presencia de cloruros. Para ambientes severamente corrosivos en los que el ACE con cloruros es lo más que preocupa, se debe considerar la posibilidad de utilizar los superausteníticos, los AI dúplex o los superferríticos. Para ambientes corrosivos menos severos, los AI ferríticos, como el tipo 430, puede ser el adecuado. El bajo contenido de aleantes de esta calidad reduce su resistencia a la corrosión, pero también abarata mucho su costo respecto a los tipos 304 y 316 y las súper aleaciones. El tipo 430 resiste sin problemas los alimentos, el agua dulce y la corrosión atmosférica no marina [57].

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1. Análisis químico del agua.

Los factores que generalmente favorecen a la corrosividad del agua son:

- Valores de pH bajo.
- Oxígeno disuelto en el agua.
- Cloro residual libre alto.
- Alcalinidad baja.
- Concentración de sólidos disueltos alta.
- Dureza por calcio baja.
- Temperatura alta.

Los factores antes mencionados fueron considerados en el análisis químico de agua utilizada en el micro ingenio ASPROCA, obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la tabla 5.1, los cuales se utilizarán para determinar los índices de corrosividad del agua.

TABLA 5.1. ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA.

| DETERMINACIÓN | UNIDADES | MÉTODO | RESULTADOS |
|--|-----------|-------------------------|------------|
| pH | Und | 4500-B | 7,01 |
| Conductividad | μSiems/cm | 2510-B | 82,6 |
| Dureza como CaCO ₃ | ppm | 2340-C | 48 |
| Cloruros | mg/L | 4500-Cl-B | 21,2 |
| Sulfatos | mg/L | 4500-SO ₄ -E | 4,5 |
| Alcalinidad de Bicarbonatos expresada como CaCO ₃ | mg/L | 2320-C | 44,0 |
| Anhídrido carbónico | mg/L | 4500-CO ₂ -D | 15,12 |
| Oxígeno Disuelto | ppm | 4500-O-C | 6,1 |
| Hierro | mg/L | 3500-Fe-D | 0,14 |

Los parámetros más utilizados para evaluar la corrosividad son:

5.1.1. Índice de Langelier.

Es una medida del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, alcalinidad y dureza.

El índice de langelier está definido por la ecuación:

$$ISL = pH - pHS \quad (5.1)$$

$ISL > 0$ Agua sobresaturada incrustante tiende a precipitar **CaCO₃**.

$ISL = 0$ Agua saturada en equilibrio con **CaCO₃**, ni disuelve ni deposita **CaCO₃**.

$ISL < 0$ Agua subsaturada, corrosiva tiende a disolver **CaCO₃**.

pH Valor real del pH del agua.

pHS Al pH de saturación o pH para el cual el agua no disuelve ni precipita CaCO₃.

5.1.2. Índice de Ryznar.

Similar al índice de Langelier y basado en los mismos parámetros, el índice de Ryznar se define por la ecuación:

$$IR = 2pH_s - pH \quad (5.2)$$

$IR < 6,5$ Agua sobresaturada, tiende a precipitar $CaCO_3$.

$6,5 < IR < 7,0$ Agua saturada en equilibrio con $CaCO_3$ ni disuelve ni deposita $CaCO_3$.

$IR > 7,0$ Agua subsaturada, corrosiva tiende a disolver $CaCO_3$.

TABLA 5 .2. COMPARACIÓN DE LOS ÍNDICES DE SATURACIÓN [58].

| Característica | Índice de Langelier | Índice de Ryznar |
|------------------------|---------------------|------------------|
| Muy agresiva | <-2,0 | >10,0 |
| Moderadamente agresiva | -2,0 a 0,0 | 6,5 a 10,0 |
| No agresiva | >0,0 | < 6,5 |

5.1.3. PH de Saturación (pHS).

Se entiende como pH de saturación cuando el agua no disuelve ni deposita $CaCO_3$. El pHS de saturación se puede calcular en el laboratorio o calcular por medio de la siguiente ecuación [59].

$$pHS = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (5.3)$$

$$A = (\text{Log } [TDS] - 1)/10 = (\text{Log } [53 \text{ mg/l}] - 1)/10 = 0.0724$$

$$B = -13,12 \times \text{Log } (^\circ\text{C} + 273) + 34,55 = -13,12 \times \text{Log } (20 \text{ }^\circ\text{C} + 273) + 34,55 = 2.1846$$

$$C = \text{Log } [Ca^{+2} \text{ como } CaCO_3] = \text{Log } [48 \text{ mg/L}] = 1.6812$$

$$D = \text{Log } [\text{Alcalinidad como } CaCO_3] = \text{Log } [44 \text{ mg/L}] = 1.6434$$

Dónde:

A=constante cuyo valor depende del contenido de sólidos disueltos totales.

B=constante cuyo valor depende la temperatura del agua.

C=constante cuyo valor depende de la concentración de carbonato de calcio (dureza).

D=contante cuyo valor depende de la alcalinidad.

Los datos que se reemplazan en las diferentes variables enunciadas se encuentran en la tabla 5.1.

$$pHS = 8,2324$$

- **El Índice de saturación de Langelier (ISL):**

$$ISL = pHA - pHS \quad (5.4)$$

Dónde:

$$pHA = pH \text{ actual del agua } (7,01)$$

$$pHS = pH \text{ de saturación } (8,2324)$$

Resultando que el Índice de Langelier: $ISL = -1.2224 < 0$

Es moderadamente agresiva.

Se toleran variaciones de $\pm 0,5$ en la aplicación del índice de Langelier.

- **Índice de estabilidad de Ryznar (IR)**

$$IR = 2(pHS) - pHA \quad (5.5)$$

$$IR = 9,4548$$

Es moderadamente agresiva.

Considerando el Índice práctico de incrustación de Puckorius se tiene:

$$IP = 2(pHS) - pHEQ \quad (5.6)$$

Dónde:

$$pHEQ = 1,465 \times \text{Log} [\text{Alcalinidad}] + 4,54 \quad (5.7)$$

$$pHEQ = 1,465 \times \text{Log} [44 \text{ mg/L}] + 4,54$$

$$pHEQ = 6,9476$$

Resultando $IP = 9,5172 > 6,5$ por lo existe tendencia a la corrosión.

En la tabla 5.3 se encuentran los resultados obtenidos.

TABLA 5.3. RESULTADOS OBTENIDOS.

| Índices | Resultado | Característica |
|--|----------------------------|---------------------------|
| El Índice de saturación de Langelier | ISL = -1.2224 < 0 | Moderadamente agresiva. |
| Índice de estabilidad de Ryznar | IR = 2(pHS) - pHA = 9.4548 | Moderadamente agresiva. |
| Índice práctico de Incrustación de Puckorius | IP = 9,5172 > 6,5 | Tendencia a la corrosión. |

5.2. Tratamiento de Agua para Calderas.

El análisis y tratamiento previo del agua que se utiliza en la caldera de vapor es una inversión a futuro a corto plazo que garantiza disminuir daños y problemas por corrosión, evitar paros inesperados, problemas de operación de la planta, mantenimiento correctivo no programado, evitar futuros accidentes, consecuentemente prolongar la vida útil del equipo.

El objetivo principal del tratamiento de agua es evitar problemas de corrosión e incrustaciones, asegurando la calidad del agua de alimentación y del agua contenida en la caldera, cumpliendo los requerimientos de las normas, que definen los límites recomendados para los parámetros involucrados en el tratamiento del agua [60].

5.2.1. Fuentes de Agua.

La fuente de agua de alimentación de la caldera es el río Chazo Juan, que de acuerdo al análisis químico que se realizó en el Laboratorio de Ciencias de la Espoch que se muestra en la tabla 5.1, el agua presenta alto contenido de oxígeno, dureza, grandes cantidades de cloruros y anhídrido carbónico.

5.2.2. Requerimientos del agua alimentación y caldera.

Considerando las especificaciones de la Norma Británica BS – 2486, la ABMA y el TÜV, se tienen las siguientes tablas que muestran los requerimientos que deberá satisfacer el agua de alimentación y el agua de una caldera para prevenir incrustaciones y corrosión en calderas de baja presión (hasta 10 bar)[60].

TABLA 5.4. REQUERIMIENTOS DE AGUA DE ALIMENTACIÓN [60].

| PARÁMETRO | VALOR REQUERIDO |
|---------------------------|---|
| Dureza total | < 2 ppm |
| Contenido de oxígeno | < 8 ppb |
| Dióxido de carbono | <25 mg/l |
| Contenido total de hierro | < 0,05 mg/l |
| Contenido total de cobre | < 0,01 mg/l |
| Alcalinidad total | < 25 mg/l |
| Contenido de aceite | < 1 mg/l |
| pH a 25 °C | 8,5-9,5 |
| Condición general | Incoloro, claro y libre de agentes insolubles |

TABLA 5.5. REQUERIMIENTOS DE AGUA DE CALDERA [60].

| PARÁMETRO | VALOR REQUERIDO |
|---|---|
| pH a 25 °C | 10,5-11,8 |
| Alcalinidad Total CaCO ₃ | < 700 ppm |
| Alcalinidad Cáustica | > 350 ppm |
| Secuestrantes de Oxígeno: | |
| • Sulfito de Sodio | 30-70 ppm |
| • Hidrazina | 0,1-10 ppm |
| • Taninos | 120-180 ppm |
| • Dietilhidroxilamina | 0,1-1.0 ppm (en agua alimentación) |
| Fosfato Na ₃ PO ₄ | 30-60 mg/l |
| Hierro | < 3.0 ppm |
| Sílice | 150 ppm |
| pH a 25 °C | 8,5-9,5 |
| Sólidos disueltos | <3500 ppm |
| Sólidos en suspensión | < 200 ppm |
| Conductividad | <7000 uS/cm |
| Condición general | Incoloro, claro y libre de agentes indisolubles |

5.2.3. Tratamiento con productos químicos.

Los productos químicos utilizados generalmente en calderas son los secuestrantes de oxígeno, dispersantes, anti-incrustantes, protectores y neutralizantes para las líneas de retorno de condensado.

La dosificación de los productos químicos debe ser realizada al estanque de almacenamiento de agua, en el caso de los secuestrantes de oxígeno, que son más efectivos mientras mayor es su tiempo de residencia en el agua antes de llegar a la caldera [60].

5.3. Análisis metalográfico de los cupones.

Los cupones son muestras de metal con formas y tamaños específicos para el estudio, con las mismas propiedades químicas y mecánicas del material instalado, el cual es objeto de estudio en el problema de corrosión.

Previo a la instalación de los cupones se debe hacer un análisis metalográfico de los cupones y registrar sus propiedades que permitan evaluar la tasa de corrosión por pérdida de peso.

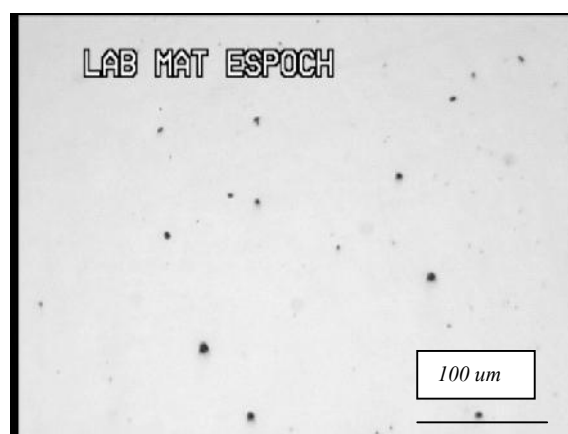
5.3.1. Análisis de inclusiones

La presencia de inclusiones no metálicas causa efectos negativos en las propiedades mecánicas de los aceros originando una distribución no homogénea de los constituyentes principales.

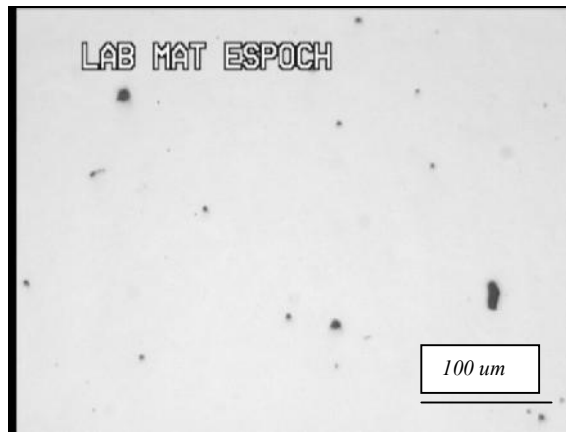
La determinación de inclusiones es importante por la influencia de estas en las propiedades mecánicas, presentando problemas de plasticidad, fatiga, corrosión, etc.

La determinación de inclusiones de los cupones del acero AISI 1015 y del acero inoxidable AISI 304 se realizó de acuerdo con la norma ASTM E45-97.

Cupones de acero AISI 1015.



Fotografía a



Fotografía b

Figura 5.1. Fotografías de inclusiones sección longitudinal a 100x.

TABLA 5.6. INCLUSIONES DE UN ACERO DE BAJO CARBONO AISI 1015.

| FORMAS Y TAMAÑOS DE INCLUSIONES (μm) | | | | |
|---|------------------|---------|-----------|-----------------|
| Figura 5.2 | A | B | C | D |
| | SULFUROS | ALÚMINA | SILICATOS | ÓXIDOS |
| (a) | | | | 8 μm |
| (b) | 20 μm | | | 9 μm |

Las inclusiones que se encuentran en las fotografía (a) son óxidos globulares tipo D 2 ½, en un número de 14 inclusiones de tamaño grueso de acuerdo a la morfología de inclusiones en el acero según la norma ASTM E 45-97 como se muestra en la figura 5.2, en la fotografía (b) se encuentran óxidos globulares de tipo D 2, en un número de 14 inclusiones de acuerdo a la morfología de inclusiones en el acero según la norma ASTM E 45-97 como se muestra en la figura 5.3. Existe también la presencia de sulfuros 1/ 2, en número de dos inclusiones de acuerdo a la morfología de inclusiones en el acero según la norma ASTM E 45-97 como se muestra en la figura la figura 5.4.

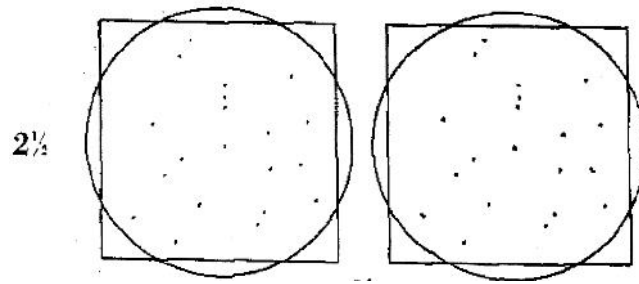


Figura 5.2. Inclusiones tipo D 2 1/2 óxidos globulares según ASTM E 45-97.

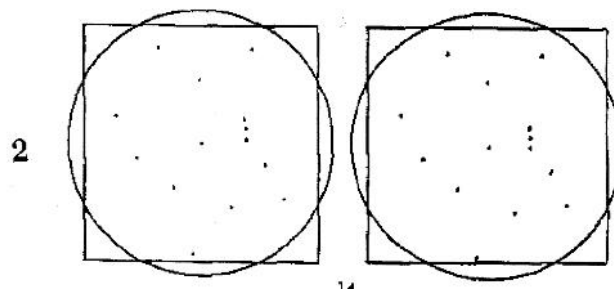


Figura 5.3. Inclusiones tipo D 2 óxidos globulares según ASTM E 45-97.

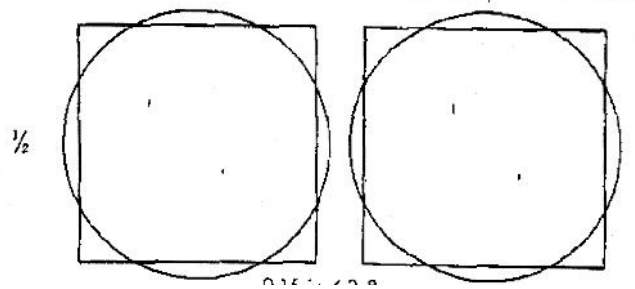
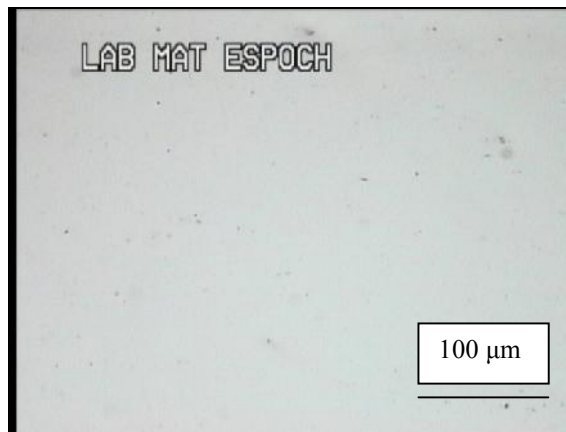
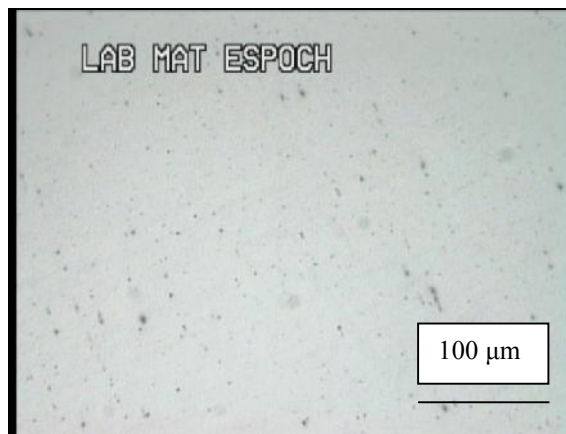


Figura 5.4. Inclusiones tipo A 1/2 sulfuros según ASTM E 45-97.

Cupones de acero inoxidable AISI 304.



Fotografía a



Fotografía b

Figura 5.5. Fotografías de inclusiones sección longitudinal a 100x.

TABLA 5.7. INCLUSIONES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304.

| FORMAS Y TAMAÑOS DE INCLUSIONES (μm) | | | | |
|---|----------|---------|-----------|-------------------|
| Figura | A | B | C | D |
| 5.2 | SULFUROS | ALÚMINA | SILICATOS | ÓXIDOS |
| (a) | | | | 0,7 μm |
| (b) | | | | 0,8 μm |

Las inclusiones que se encuentran en las fotografía (a) son óxidos globulares tipo D 3 en un número de 26 inclusiones de tamaño delgado de acuerdo a la

morfología de inclusiones en el acero según la norma ASTM E 45-97, como se muestra en la figura 5.6. En la fotografía (b) se encuentran óxidos globulares tipo D 5 en un número de 64 inclusiones de tamaño delgado según la morfología de inclusiones según la norma ASTM E-45-97, como se muestra en la figura 5.7.

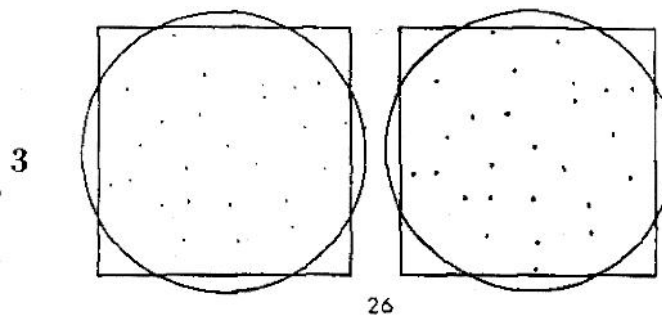


Figura 5.6. Inclusiones tipo D 3 óxidos globulares según ASTM E 45-97.

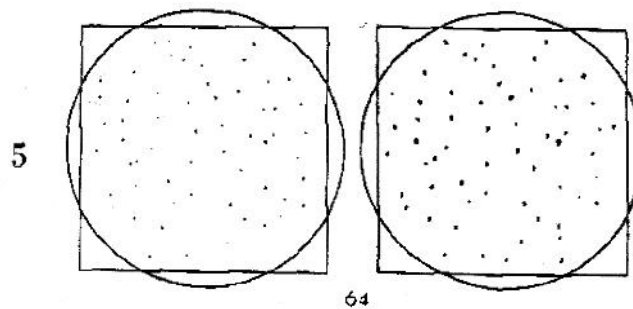


Figura 5.7. Inclusiones tipo D 5 óxidos globulares según ASTM E 45-97.

5.3.2. Tamaño de grano de un acero AISI 1015.

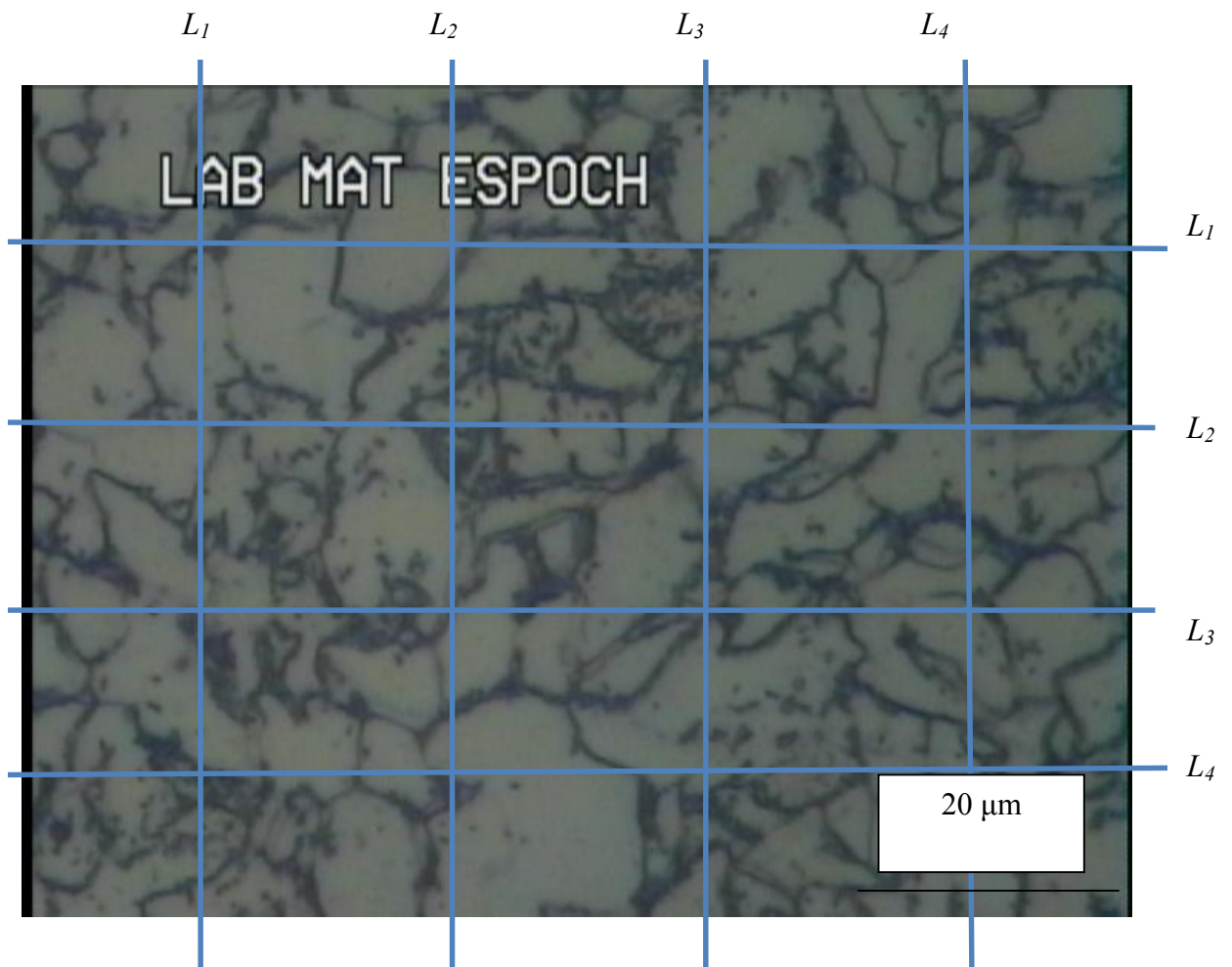


Figura 5 .8. Sección longitudinal del cupón de un acero AISI 1015 atacado químicamente con Nital al 4% a una escala real de 500x.

- Tamaño de grano horizontal por el método de intersección.

$$\bar{L} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{4} \quad (5.8)$$

$$\bar{L} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{4}$$

$$\bar{L} = \frac{16 + 12 + 15,5 + 11,5}{4} = 13,75$$

$$E = \frac{85}{\bar{L}} = \frac{85}{13,75} = 6,18 \mu m$$

$$G = 10 - 6,6439 \log\left(\frac{6,10}{10}\right) \quad (5.9)$$

$$G = 11,388 \approx 11$$

- Tamaño de grano vertical por el método de intersección.

$$\bar{L} = \frac{L1 + L2 + L3 + L4}{4} \quad (5.10)$$

$$\bar{L} = \frac{8 + 12 + 12 + 8}{4} = 10$$

$$E = \frac{63,75}{\bar{L}} = \frac{63,75}{10} = 6,375 \mu m$$

$$G = 10 - 6,6439 \log\left(\frac{6,375}{10}\right) \quad (5.11)$$

$$G = 11,299 \approx 11$$

La microestructura del cupón del acero AISI 1015 presenta un tamaño de grano ASTM 11 como se observar claramente.

5.3.3. Tamaño de grano del acero inoxidable AISI 304.

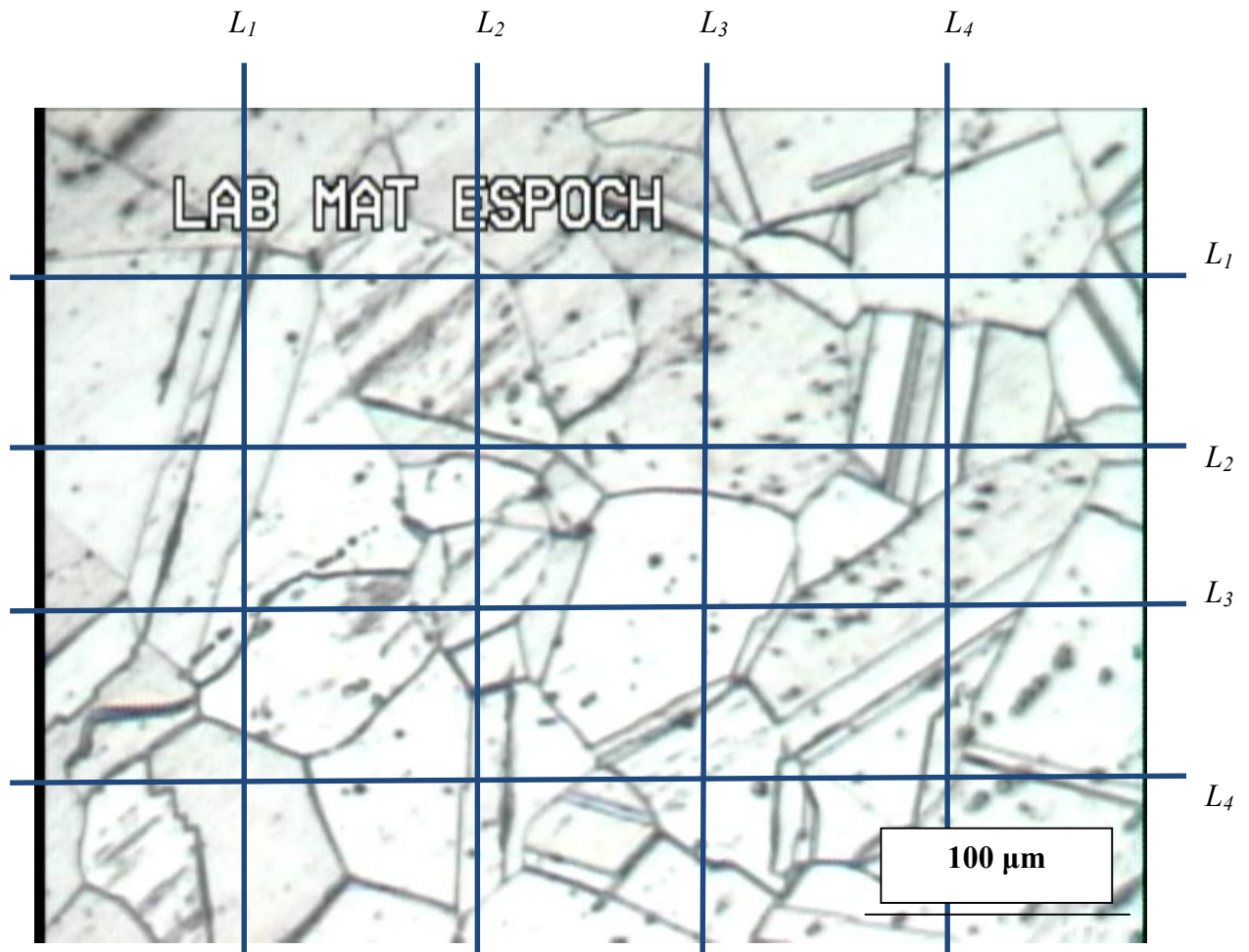


Figura 5.9. Sección longitudinal de un acero inoxidable AISI 304 recocido y atacado químicamente con ácido oxálico a 500x.

- Tamaño de grano horizontal por el método de intersección.

$$\bar{L} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{4} \quad (5.12)$$

$$\bar{L} = \frac{7,5 + 12 + 12,5 + 13}{4} = 11,25$$

$$E = \frac{420}{\bar{L}} = \frac{420}{11,25} = 37,333 \text{ } \mu\text{m}$$

$$G = 10 - 6,6439 \log\left(\frac{37,333}{10}\right) \quad (5.13)$$

$$G = 6,19 \approx 6$$

- **Tamaño de grano vertical por el método de intersección.**

$$\bar{L} = \frac{L1 + L2 + L3 + L4}{4} \quad (5.14)$$

$$\bar{L} = \frac{5,5 + 9 + 7 + 9,5}{4} = 7,75$$

$$G = 10 - 6,6439 \log\left(\frac{54,193}{10}\right) \quad (5.15)$$

$$G = 5,123 \approx 5$$

La microestructura del acero inoxidable presenta un tamaño de grano ASTM 6 claramente definido.

5.3.4. Determinación de la dureza Brinell.

- **Cupón de acero AISI 1015.**

D=2.5 mm

P=30 D² =30* (2,5)² =187,7kgf. (1839N) Según ASTM E 10 TAB.3.

d₁=1,240mm

d₂=1,250 mm

d₃=1,260 mm

d_{promedio}=1,25

$$HB = \frac{P}{\left(\pi * \frac{D}{2}\right) \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} \quad (5.16)$$

$$HB = \frac{187.7}{\left(\pi * \frac{2.5}{2}\right)(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.25^2})} = 142,705 HB$$

- **Cupón de acero AISI 1015 recocido.**

D=2.5 mm

P=30 D² =30* (2,5)² =187,7kgf. (1839N) Según ASTM E 10 TAB.3.

d₁=1,44mm

d₂=1,46 mm

d₃=1,445 mm

d_{promedio}=1,448

$$HB = \frac{P}{\left(\pi * \frac{D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5.17)$$

$$HB = \frac{187.7}{\left(\pi * \frac{2.5}{2}\right)(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.448^2})} = 103.45 HB$$

- **Cupón de acero inoxidable AISI 304.**

D=2.5 mm

P=30 D² =30* (2,5)² =187,7kgf. (1839N) Según ASTM E 10 TAB.3.

d₁=1,065mm

d₂=1,060 mm

d₃=1,060 mm

$d_{\text{promedio}}=1,0616$

$$HB = \frac{P}{\left(\pi * \frac{D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5.18)$$

$$HB = \frac{187.7}{\left(\pi * \frac{2.5}{2}\right)(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.0616^2})} = 202,022 \text{ HB}$$

- **Cupón de acero inoxidable AISI 304 recocido**

$D=2.5 \text{ mm}$

$P=30 \text{ D}^2 = 30 * (2,5)^2 = 187,7 \text{kgf. (1839N)}$ Según ASTM E 10 TAB.3.

$d_1=1,21 \text{mm}$

$d_2=1,24 \text{ mm}$

$d_3=1,225 \text{ mm}$

$d_{\text{promedio}}=1,225$

$$HB = \frac{P}{\left(\pi * \frac{D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5.19)$$

$$HB = \frac{187.7}{\left(\pi * \frac{2.5}{2}\right)(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.225^2})} = 149,043 \text{ HB}$$

5.3.5. Cálculo Del Carbono Equivalente.

Este término fue desarrollado como una fórmula para normalizar la composición química del acero en un solo número que nos indica como la composición química podría afectar el endurecimiento o templabilidad del material, lo que nos serviría para seleccionar la temperatura de precalentamiento más adecuada. Hay muchas fórmulas, pero la más apropiada para nuestro trabajo es la indicada en AWS D1.1, con la cual obtenemos dos valores de CE, uno con las especificaciones de la norma ASTM A53, y la otra con el documento de la colada del fabricante [61].

$$CE = \% C + \frac{(\% Mn + \% Si)}{6} + \frac{(\% Cr + \% Mo + \% V)}{5} + \frac{(\% Ni + \% Cu)}{15} \quad (5.20)$$

Cuando se trabaja con aceros aleados se considera la siguiente fórmula:

$$CE = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Cu}{40} + \frac{\% Ni}{15} + \frac{\% Cr}{10} - \frac{\% Mo}{50} - \frac{\% V}{10} \quad (5.21)$$

Uno de los métodos más rápidos para determinar la soldabilidad es conocer la templabilidad del acero, por lo que es necesario conocer el término carbono equivalente.

Acero AISI 1015.

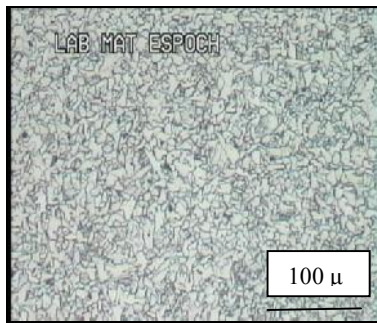
- **Composición Química.**

Anexo D

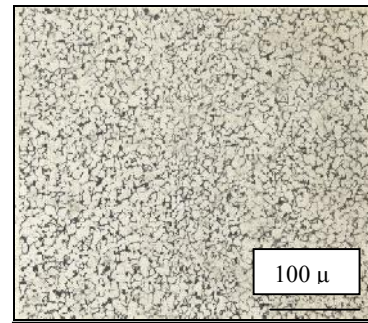
TABLA 5.8. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 1015.

| Componentes | Porcentaje (%) |
|--------------------|-----------------------|
| C | 0,15698 |
| Mn | 0,38381 |
| Si | 0,01469 |
| P | 0,01597 |
| S | 0,00894 |
| Cu | 0,01276 |
| Cr | 0,01276 |
| Ni | 0,01797 |
| Mo | 0,00181 |
| Sn | 0,00203 |
| Al | 0,02169 |
| Zn | 0,00129 |
| V | 0,00157 |
| Ti | 0,00034 |
| Nb | 0,00286 |
| W | 0,00073 |
| Co | 0,00321 |
| N | 0,17367 |
| Fe | 99.1895 |
| | |

- **Determinación del carbono equivalente del acero AISI 1015.**



Fotografía tomada en el laboratorio



Fotografía patron ASTM [62]

Figura 5.10. Microestructura del acero AISI 1015 tomada a 100 x.

TABLA 5.9. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS [62].

| ASTM and AISI Tube Steels | |
|---------------------------|---|
| A161 | 0.10-0.20 C, 0.30-0.80 Mn, 0.25 max Si(g) |
| A200, grade T5 | 0.15 max C, 0.30-0.60 Mn, 0.030 max P, 0.030 max S, 0.50 max Si, 4.00-6.00 Cr, 0.45-0.65 Mo |
| A209, grade T1 | 0.10-0.20 C, 0.30-0.80 Mn, 0.045 max P, 0.045 max S, 0.10-0.50 Si, 0.44-0.65 Mo |
| A213, grade T5c | 0.12 max C, 0.30-0.60 Mn, 0.03 max P, 0.03 max S, 0.50 max Si, 4.00-6.00 Cr, 0.45-0.65 Mo, 4×C min Ti (0.70 max) |
| A254, class I | 0.05-0.15 C, 0.27-0.63 Mn, 0.050 max P, 0.060 max S |
| 1015 | 0.13-0.18 C, 0.30-0.60 Mn, 0.040 max P, 0.050 max S |
| 1018 | 0.15-0.20 C, 0.60-0.90 Mn, 0.040 max P, 0.050 max S |
| 1025 | 0.22-0.28 C, 0.30-0.60 Mn, 0.040 max P, 0.050 max S |
| 1215 | 0.09 max C, 0.75-1.05 Mn, 0.04-0.09 P, 0.26-0.35 S |
| 4140 | 0.38-0.43 C, 0.75-1.00 Mn, 0.035 max P, 0.040 max S, 0.20-0.35 Si, 0.80-1.10 Cr, 0.15-0.25 Mo |
| 4620 | 0.17-0.22 C, 0.45-0.65 Mn, 0.035 max P, 0.040 max S, 0.20-0.35 Si, 1.65-2.00 Ni, 0.20-0.30 Mo |
| 5048 | 0.48 C, 0.30-0.50 Mn, 0.035 max P, 0.040 max S, 0.20-0.35 Si, 0.30-0.50 Cr |
| 8620 | 0.18-0.23 C, 0.70-0.90 Mn, 0.035 max P, 0.040 max S, 0.20-0.35 Si, 0.40-0.60 Cr, 0.40-0.70 Ni, 0.15-0.25 Mo |

$$CE = \% C + \frac{(\% Mn + \% Si)}{6} + \frac{(\% Cr + \% Mo + \% V)}{5} + \frac{(\% Ni + \% Cu)}{15}$$

$$CE = 0,15698 + \frac{(0,38070 + 0,01469)}{6} + \frac{(0,01143 + 0,00181 + 0,0157)}{5} + \frac{(0,017367 + 0,01276)}{15}$$

$$CE = 0,2306$$

De acuerdo al CE se puede decir que este tipo de acero debe soldarse por cualquiera de los procesos de soldadura.

- Acero inoxidable AISI 304

Composición química

TABLA 5.10. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304.

| Componentes | Porcentaje (%) |
|-------------|----------------|
| C | 0,08 |
| Mn | 2,0 |
| Si | 1,0 |
| P | 0,045 |
| S | 0,03 |
| Cr | 19 |
| Ni | 9,2 |

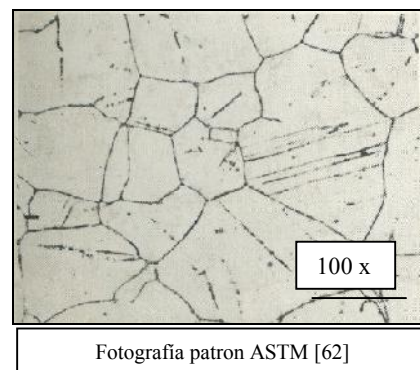
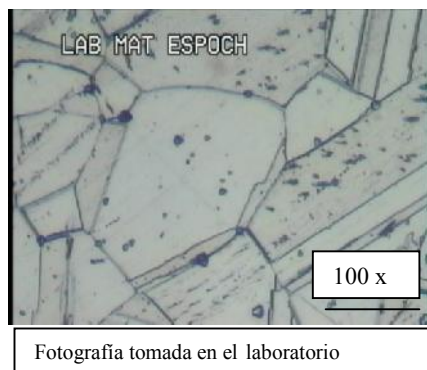


Figura 5.11. Microestructura del acero inoxidable AISI 304 tomadas a 500x.

TABLA 5.11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACERO INOXIDABLES AUSTENÍTICOS [62].

| Steel | C | Cr | Ni | Mn | Si, max | P, max | S, max | Others |
|-------------------|----------|-------------|---------------|----------|---------|--------|----------|----------------|
| Austenitic Steels | | | | | | | | |
| 201 | 0.15 max | 16.00-18.00 | 3.50-5.50 | 5.5-7.5 | 1.00 | 0.060 | 0.030 | 0.25 max N |
| 301 | 0.15 max | 16.00-18.00 | 6.00-8.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | ... |
| 302 | 0.15 max | 17.00-19.00 | 8.00-10.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | ... |
| 303 | 0.15 max | 17.00-19.00 | 8.00-10.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.20 | 0.15 min | 0.60 max Mo(a) |
| 303 (Se) | 0.15 max | 17.00-19.00 | 8.00-10.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.20 | 0.05 | 0.15 min Se |
| 304 | 0.08 max | 18.00-20.00 | 8.00-12.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | ... |
| 304L | 0.03 max | 18.00-20.00 | 8.00-12.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | ... |
| 305 | 0.12 max | 17.00-19.00 | 10.50-13.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | ... |
| 310 | 0.25 max | 24.00-26.00 | 19.00-22.00 | 2.00 max | 1.50 | 0.045 | 0.030 | ... |
| 316 | 0.08 max | 16.00-18.00 | 10.00-14.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | 2.00-3.00 Mo |
| 316L | 0.03 max | 16.00-18.00 | 10.00-14.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | 2.00-3.00 Mo |
| 321 | 0.08 max | 17.00-19.00 | 9.00-12.00(b) | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | 5×C min Ti |
| 347 | 0.08 max | 17.00-19.00 | 9.00-13.00 | 2.00 max | 1.00 | 0.045 | 0.030 | 10×C min Cb+Ta |

- Determinación del carbono equivalente del acero inoxidable AISI 304

$$CE = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Cu}{40} + \frac{\% Ni}{15} + \frac{\% Cr}{10} - \frac{\% Mo}{50} - \frac{\% V}{10}$$

$$CE = 0,08 + \frac{2,0}{6} + \frac{0}{40} + \frac{9,2}{15} + \frac{19}{10} - \frac{0}{50}$$

$$CE = 2,773$$

El contenido de cromo aumenta la templabilidad del acero. El cromo en el acero se encuentra formando óxido de cromo dificultando la soldabilidad. Este elemento de adición actúa claramente sobre la templabilidad de la zona de transformación durante el soldeo.

5.4. Tasa de corrosión de los materiales.

5.4.1. Preparación de los cupones.

- La especificación química del cupón deberá ser de bajo contenido de carbono (SAE 1015 o SAE 1018).
- Los cupones de corrosión serán expuestos directamente al medio corrosivo durante cierto período de tiempo. Para este estudio exponemos a los cupones 90 días..

- Es importante que los cupones no presenten imperfecciones a fin de que no se tengan zonas activas las cuales no favorezcan la corrosión localizada.
- Los cupones deberán ser marcados para su identificación.
- No se deberán aplicar lavados ácidos para la preparación de superficie.
- Desengrasar los cupones con los solventes apropiados, por ejemplo acetona.
- Después del secado, los cupones serán pesados en balanza analítica con aproximación de 0.0001 gr.
- Los cupones deberán almacenarse en el desecador hasta su instalación.
- Durante y después de la operación de limpieza, el cupón deberá ser manejado en forma adecuada para evitar la contaminación de la superficie metálica [63].

5.4.2. Tipos de cupones.

Existe una gran variedad de formas y tamaños dependiendo de su aplicación sea para líquidos o gases. Para este estudio se considera el siguiente en base a lo recomendado por PEMEX No. 4.411.03:

Dimensiones: 2 " x 7/8" x 1/8".

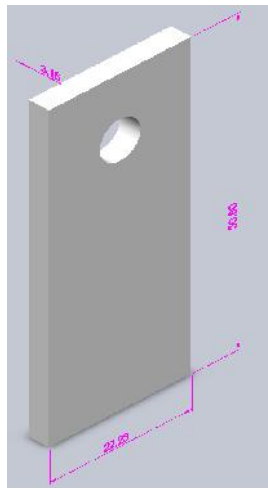


Figura 5.12. Dimensiones del cupón.

5.4.3. Selección de portacupones.

Para la sujeción de los cupones se emplearán hilo de nylon y recipientes plásticos desinfectados y limpios de sustancias que no actúen de una manera negativa en el desarrollo de este estudio, como se muestra en la figura y así se evitará la corrosión galvánica.



Figura 5.13. Instalación de los cupones.



Figura 5.14. Instalación de los cupones.

Los portacupones empleados deberán cumplir con los siguientes requerimientos:

- Permitir un adecuado soporte de los cupones.
- Adecuado aislamiento eléctrico entre el cupón y el portacupones para evitar la corrosión galvánica.
- Facilidad de manejo en la instalación y retiro de los cupones bajo condiciones de operación.

5.4.4. Limpieza química de los cupones.

El tratamiento químico para remover los depósitos de corrosión deberá efectuarse de acuerdo a la norma NACE RPO775-2005.Sección 2.3.4.Para cupones de acero [64].

Se utilizan dos soluciones, una para el ataque ácido (A) y otra para neutralizar el ataque (B).La temperatura de limpieza será de 20°C.

TABLA 5 .12. SOLUCIONES PARA DECAPADO

| SOLUCIÓN A | | SOLUCIÓN B | |
|--------------------------|----------|----------------------|----------|
| COMPONENTE | CANTIDAD | COMPONENTE | CANTIDAD |
| Ácido Clorhídrico al 10% | 90ml | Bicarbonato saturado | 5g |
| Agua destilada | 10ml | Agua destilada | 100ml |

Se hace una limpieza del cupón con agua y detergente, posterior a eso se sumerge el cupón en la solución A, en un lapso de 15 segundos, luego se sumerge el cupón en la solución B para neutralizar el ataque por un lapso de 60 segundos.

El cupón se lava con agua y detergente utilizando un cepillo de cerdas suaves, para remover cualquier depósito que no haya sido desprendido en la limpieza química.

Los cupones serán pesados en una balanza analítica. Se deberá utilizar la misma balanza analítica que se utilizó para pesar los cupones antes de la exposición.



Figura 5.15. Balanza analítica.

5.4.5. Determinación de la velocidad de corrosión .

Para determinar la rata de corrosión se utilizó la ecuación 3.2.

$$C = K \cdot \frac{W}{D \cdot A \cdot t}$$

5.4.6. Densidad del material.

Para este estudio se consideran la densidad del Acero al carbono y la densidad del Acero Inoxidable 304.

TABLA 5.13. DENSIDAD DE LOS ACEROS [65].

| Material | Densidad (g/cm ³) |
|---------------------------|-------------------------------|
| Acero AISI 1015 | 7,85 |
| Acero inoxidable AISI 304 | 7,93 |

5.4.7. Datos de la pérdida de peso y la velocidad de corrosión de los aceros expuestos a diferentes medios.

- **Cupones de acero al carbono AISI 1015.**

TABLA 5.14. PÉRDIDA DE PESO Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO AISI 1015.

| N° | Área (mm ²) | Área (in ²) | espesor (mm) | medio | Peso antes (g) | Peso después (g) | pérdida de peso (g) | tiempo (días) | C (mpy) | Resistencia del material a la corrosión |
|----|----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------|----------------------|------------------------|---------------------------|------------------|-------------|---|
| 1 | 1455,87 | 2,2566 | 3,7 | jugo | 41,8717 | 41,7684 | 0,1033 | 30 | 4,32945 | muy bueno |
| 2 | 1593,8 | 2,4703 | 3,7 | jugo | 46,2283 | 45,6868 | 0,5415 | 60 | 10,3654 | bueno |
| 3 | 1263,76 | 1,9588 | 3,7 | jugo | 42,9207 | 41,8972 | 1,0235 | 90 | 16,4724 | bueno |
| 4 | 1506,99 | 2,3358 | 3,7 | agua | 44,263 | 43,0389 | 1,2241 | 30 | 49,5634 | regular |
| 5 | 1209,5 | 1,8747 | 4,5 | agua | 45,6987 | 43,6268 | 2,0719 | 60 | 52,2622 | regular |
| 6 | 1224,14 | 1,8974 | 4,5 | agua | 45,656 | 43,201 | 2,455 | 90 | 40,7898 | regular |
| 7 | 1224 | 1,8972 | 4,5 | atmósfera | 43,8413 | 43,8215 | 0,0198 | 30 | 0,98704 | muy bueno |
| 8 | 1283,97 | 1,99015 | 4,5 | atmósfera | 48,1818 | 48,0001 | 0,1817 | 60 | 4,31742 | muy bueno |
| 9 | 1292,85 | 2,0039 | 4,5 | atmósfera | 49,4255 | 49,0865 | 0,339 | 90 | 5,3331 | bueno |

- **Cupón de acero inoxidable AISI 304.**

TABLA 5.15. PÉRDIDA DE PESO Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304 EN DIFERENTES MEDIOS.

| N° | Área (mm ²) | Área (in ²) | espesor (mm) | medio | Peso antes (g) | Peso después (g) | pérdida de peso | tiempo días | C (mpy) | Resistencia del material a la corrosión |
|----|-------------------------|-------------------------|--------------|-----------|----------------|------------------|-----------------|-------------|---------|---|
| 1 | 995,72 | 1,543369 | 3,8 | Jugo | 28,7441 | 28,6945 | 0,0496 | 30 | 3,0088 | muy bueno |
| 2 | 1118,59 | 1,733818 | 3,8 | Jugo | 31,7134 | 31,5664 | 0,147 | 60 | 3,9688 | muy bueno |
| 3 | 994,7162 | 1,541813 | 3,8 | Jugo | 28,7345 | 28,5449 | 0,1896 | 90 | 3,8376 | muy bueno |
| 4 | 957,28 | 1,483787 | 3,8 | agua | 27,5072 | 27,4626 | 0,0446 | 30 | 2,8141 | muy bueno |
| 5 | 930,3 | 1,441968 | 3,8 | agua | 26,8677 | 26,6535 | 0,2142 | 60 | 6,9439 | bueno |
| 6 | 923,177 | 1,430927 | 3,8 | agua | 26,3126 | 26,0138 | 0,2988 | 90 | 6,5166 | bueno |
| 7 | 948,6 | 1,470333 | 3,8 | atmosfera | 27,0694 | 27,0068 | 0,0626 | 30 | 3,9860 | muy bueno |
| 8 | 562,875 | 0,872458 | 3,8 | atmosfera | 28,4066 | 28,324 | 0,0826 | 60 | 4,4318 | muy bueno |

5.4.8. Velocidades de Corrosión.

Dependiendo del material y ambiente específicos, la velocidad de corrosión puede ser:

- Lineal
- Decrece con el tiempo
- Se incrementa con el tiempo

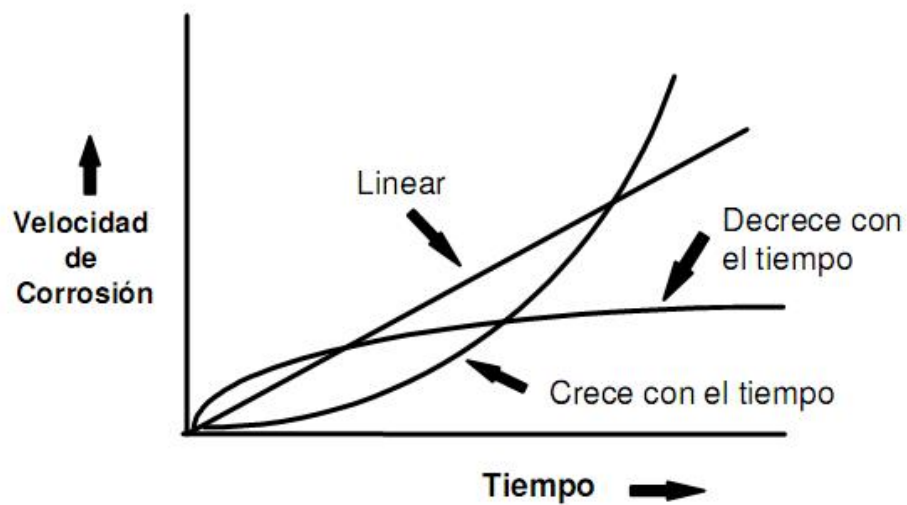


Figura 5.16. Velocidad de Corrosión vs tiempo.

Cuando la velocidad de corrosión es lineal o decrece con el tiempo, es posible hacer proyecciones del daño por corrosión. Cuando la velocidad de corrosión se incrementa con el tiempo (ej. de manera exponencial) su predicción a largo tiempo es mucho más difícil.

Pérdida de peso del acero AISI 1015.

Acero AISI 1015 expuestos a diferentes medios:

- **Cupón expuesto al jugo de caña.**

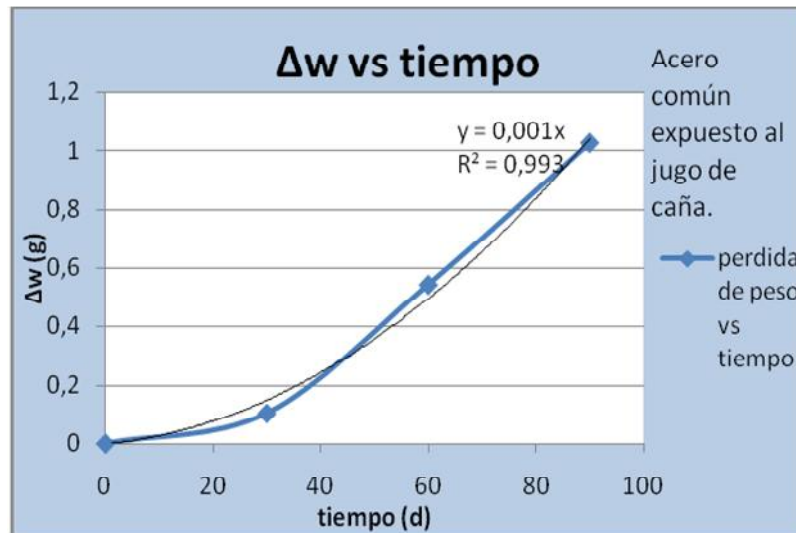


Figura 5.17. Diferencial de peso AISI 1015 en jugo de caña.

Según la gráfica de la pérdida de peso del acero AISI 1015 en función del tiempo expuesto al jugo de caña, se determina que la pérdida de peso del material tiende a crecer con el tiempo, demostrando que este material es susceptible a sufrir un desgaste o deterioro prematuro esto se debe principalmente a la agresividad del medio al tener una alta concentración de acidez.

- **Cupón expuesto al agua de la localidad.**

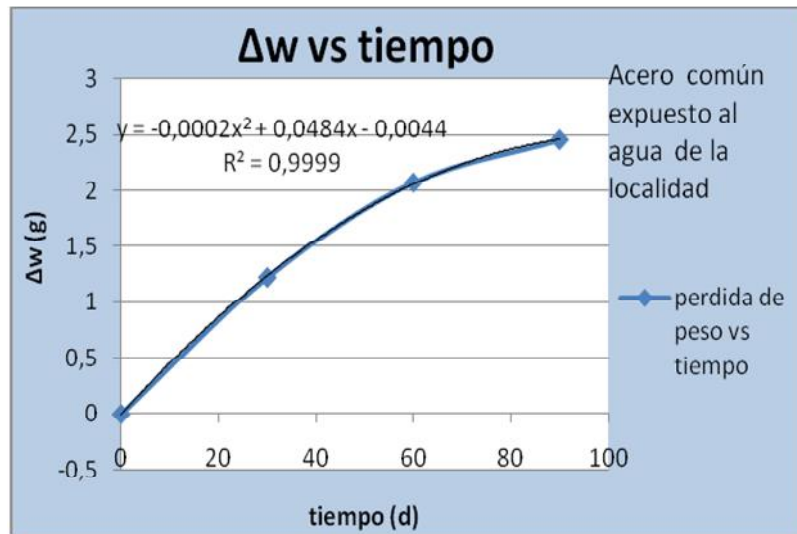


Figura 5.18. Diferencial de peso AISI 1015 en agua.

Observando la gráfica de pérdida de peso vs tiempo del acero AISI 1015 expuesto al agua de la localidad, se determina que la pérdida de peso del material tiende a decrecer con el tiempo, esto se debe a que el material tiende a protegerse formando una película protectora, neutralizando el ataque del medio.

- **Cupón expuesto a la atmósfera.**

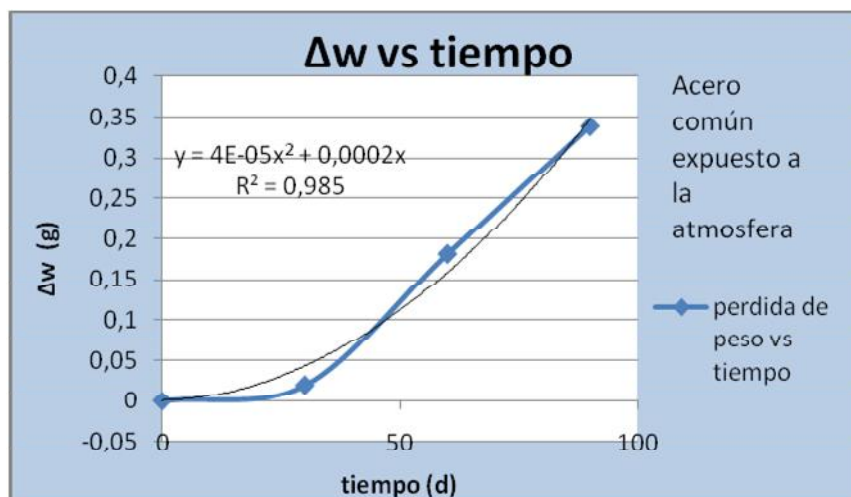


Figura 5.19. Diferencial de peso AISI 1015 en la atmósfera.

Al observar la gráfica de pérdida de peso vs tiempo de un acero AISI 1015 expuesto a la atmósfera se puede determinar que la pérdida de peso del material tiende a crecer con el

tiempo, se debe principalmente a la cantidad de agua presente en la atmósfera, actuando como electrolito cerrando el circuito electroquímico que dará lugar a la corrosión en sus diferentes manifestaciones.

Pérdida de peso del acero inoxidable AISI 304.

- **Cupón expuesto al jugo de caña.**

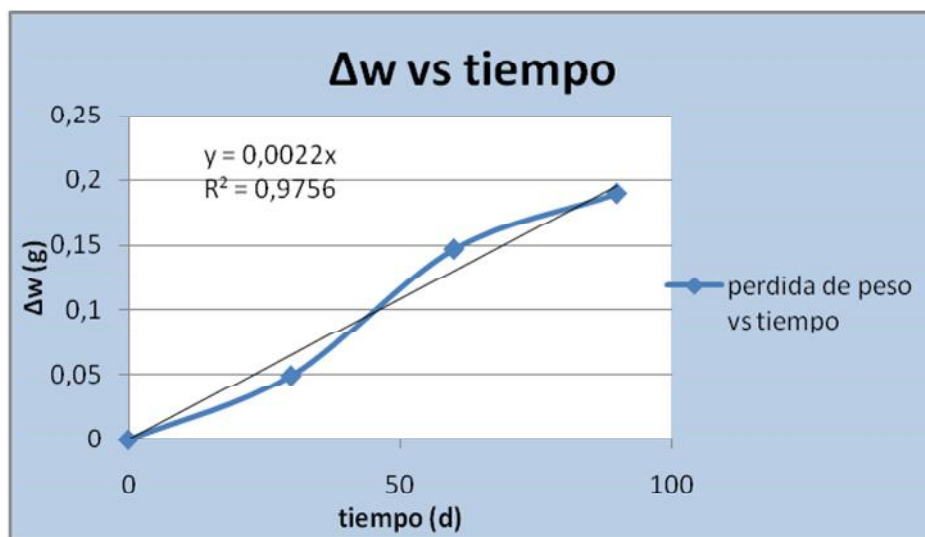


Figura 5.20. Diferencial de peso AISI 304 en jugo.

Al observar la gráfica de la pérdida de peso vs tiempo podemos determinar que la pérdida de peso va creciendo en forma lineal esto se debe principalmente a la película de óxido de cromo que se forma en el acero inoxidable, esta actúa de manera que el material tienda a protegerse del medio agresivo.

- **Cupón expuesto al agua de la localidad.**

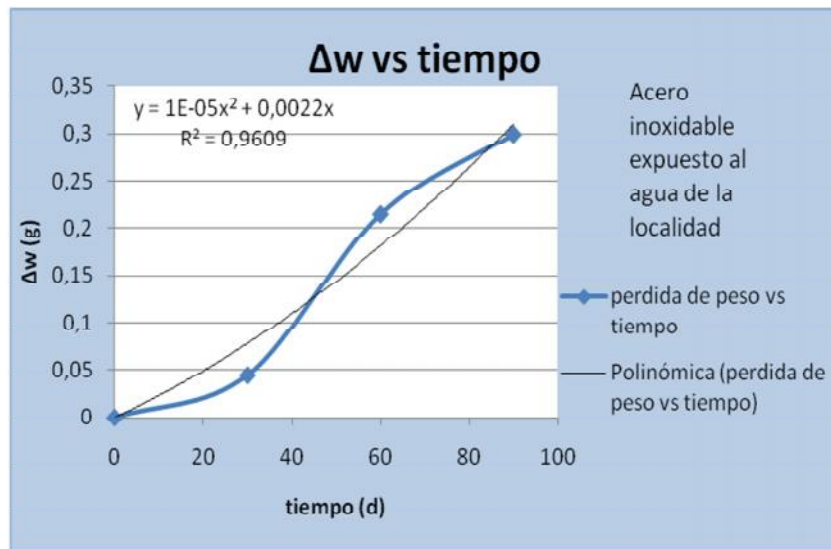


Figura 5.21. Diferencial de peso AISI 304 en agua.

Según la gráfica de pérdida de peso vs tiempo del acero inoxidable AISI 304 expuesto al agua de la localidad se determina que la pérdida de peso crece con el tiempo al exponerle inicialmente con el medio, luego el material tiende a pasivarse a medida que transcurre el tiempo.

- **Cupón expuesto a la atmósfera.**

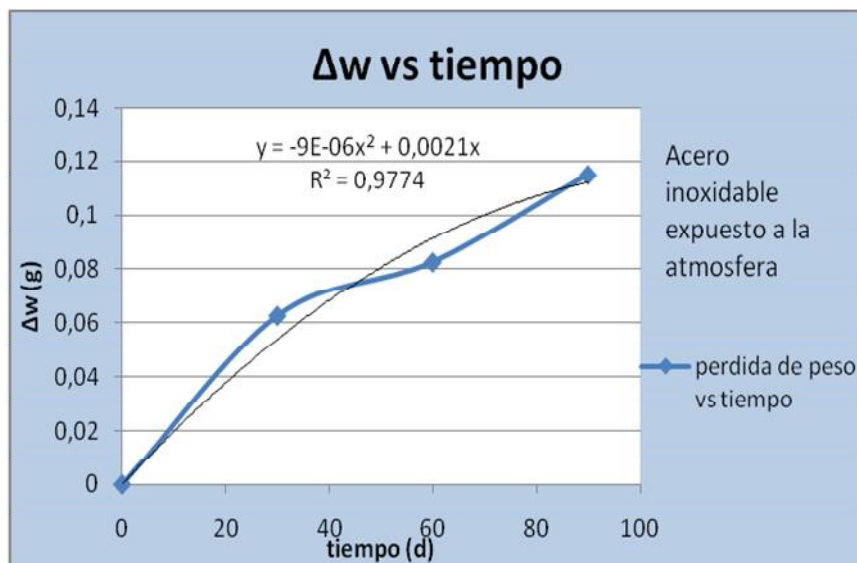


Figura 5.22. Diferencial de peso AISI 304 en la atmósfera.

Según la gráfica de pérdida de peso vs tiempo del acero inoxidable AISI 304 se puede determinar que la pérdida de peso va decreciendo con el tiempo, debido a la película de óxido de cromo que protege al material.

5.4.9. Rata de corrosión de los aceros.

- Acero AISI 1015 expuesto al jugo de caña.

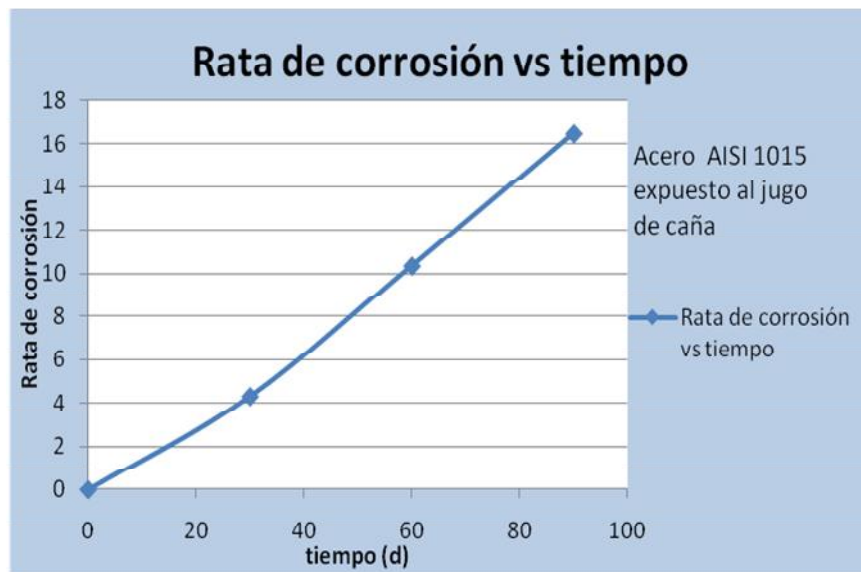


Figura 5.23. Velocidad de corrosión AISI 1015 en jugo.

De acuerdo a la gráfica de la rata de corrosión vs tiempo se puede determinar que la velocidad de corrosión crece en forma exponencial con el tiempo, esto se debe a que el material no posee buenas características de resistencia a la corrosión al estar en contacto con este medio.

- **Acero AISI 1015 expuesto al agua de la localidad.**

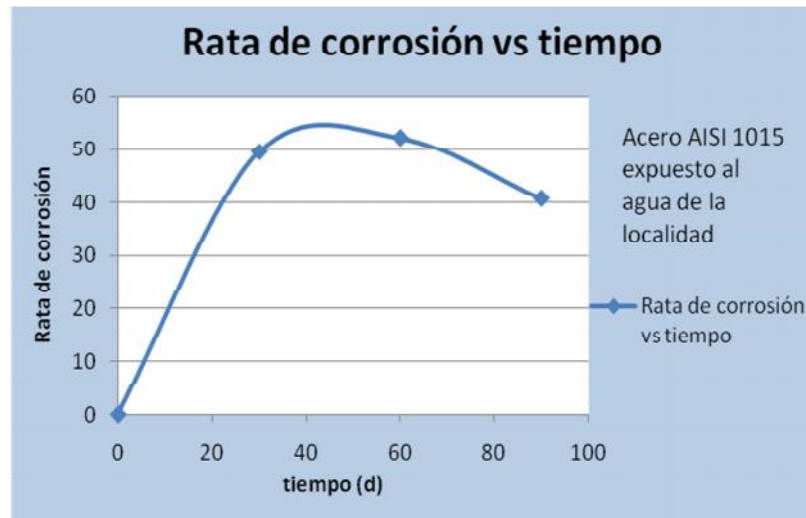


Figura 5.24. Velocidad de corrosión AISI 1015 en agua.

Según la gráfica se puede observar que la rata de corrosión del acero AISI 1015 al estar en contacto con el agua de la localidad tiende a decrecer con el tiempo, esto se debe principalmente a que el material tiende a forma un película de óxido que disminuye el efecto agresivo del medio.

- **Acero AISI 1015 expuesto a la atmosfera.**

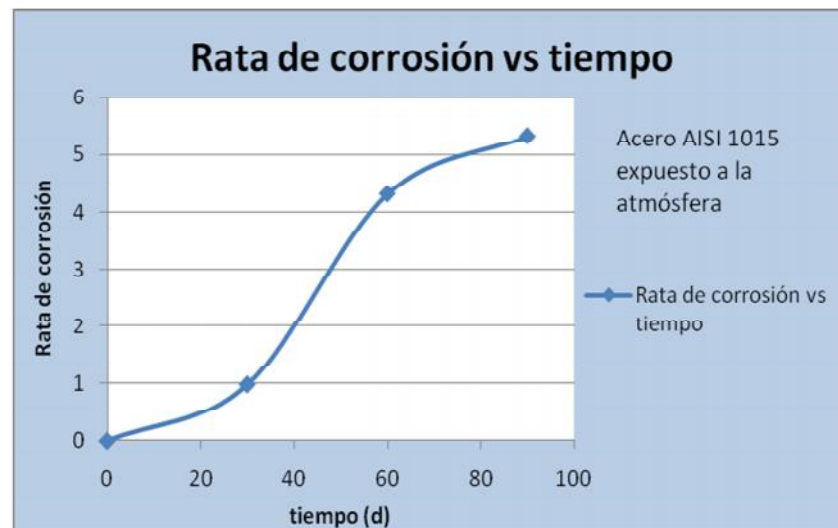


Figura 5.25. Velocidad de corrosión AISI 1015 en la atmósfera.

La tasa de de corrosión del acero AISI 1015 tiende a decrecer con el tiempo debido a la película de óxido de hierro que se forma en la superficie disminuyendo el ataque agresivo del medio en contacto.

- **Acero inoxidable AISI 304 expuesto al jugo de caña.**

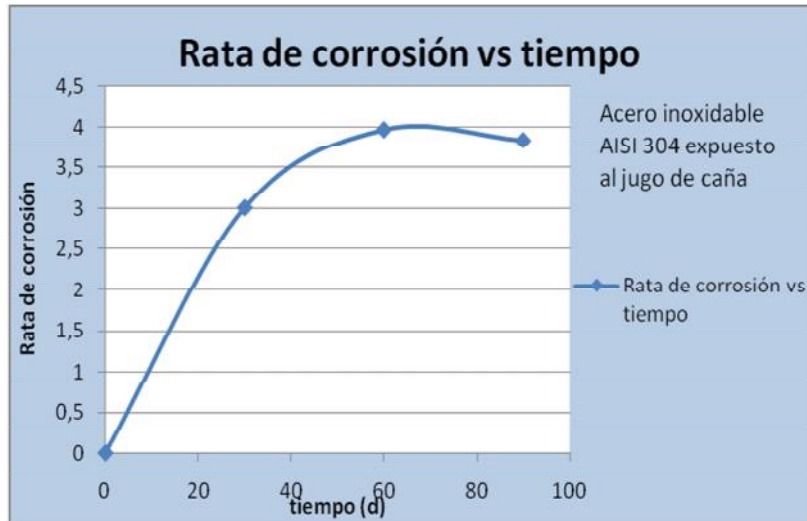


Figura 5.26. Velocidad de corrosión AISI 304 en jugo.

La tasa de corrosión del acero inoxidable AISI 304 tiende a decrecer con el tiempo, esto se debe a que el material posee muy buena resistencia a la corrosión al estar en contacto con este medio.

- **Acero inoxidable AISI 304 expuesto al agua de la localidad.**

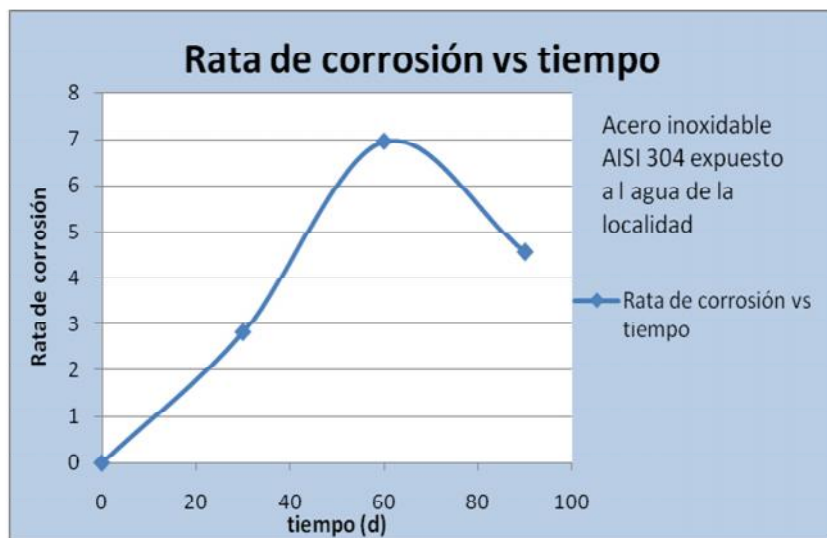


Figura 5.27. Velocidad de corrosión AISI 304 en agua.

La tasa de corrosión del acero inoxidable AISI 304 tiende a decrecer con el tiempo, esto se debe a que el material posee muy buena resistencia a la corrosión al estar en contacto con este medio, disminuyendo la velocidad de corrosión significativamente a través del tiempo.

- **Acero inoxidable AISI 304 expuesto a la atmósfera.**

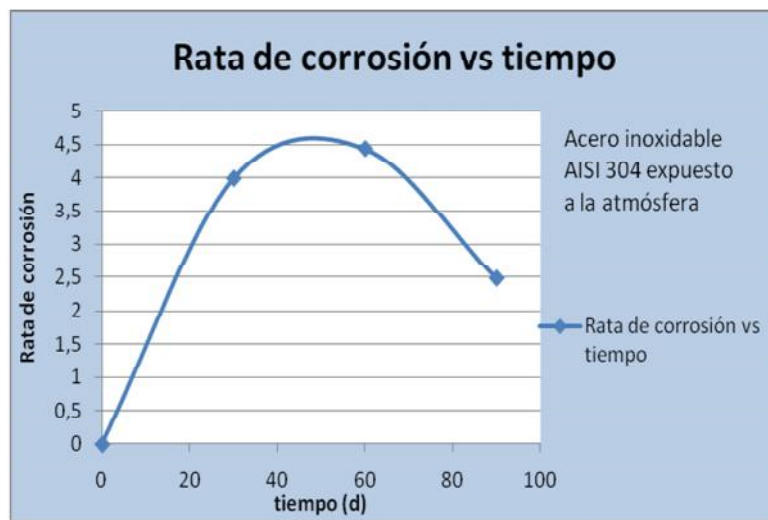


Figura 5.28. Velocidad de corrosión AISI 304 en la atmósfera.

La tasa de corrosión del acero inoxidable AISI 304 tiende a decrecer con el tiempo, después de un aumento acelerado al inicio progresivamente va disminuyendo conforme pasan los días, esto se debe a que el material posee muy buena resistencia a la corrosión al estar en contacto con este medio, gracias a la película de óxido de cromo que hace que el material tienda a inmunizarse.

Al observar las gráficas y los resultados obtenidos, podemos determinar que la tasa de corrosión del acero AISI 1015 es alta especialmente trabajando con el jugo de caña y el agua de la localidad, lo que nos indica que el medio en donde está inmerso el material es muy agresivo deteriorándolo prematuramente.

De acuerdo a las gráficas y resultados obtenidos podemos determinar que el acero inoxidable AISI 304 presenta muy buena resistencia a la corrosión a estar en contacto con estos medios, siendo este material la mejor alternativa para la elaboración de los nuevos equipos y tuberías.

5.5. Análisis de herrumbres.

Las herrumbres son productos porosos, heterogéneos formados por una mezcla óxido de hierro hidratado $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ de color rojo oscuro y de óxido de hierro Fe_3O_4 , que se forma sobre los metales ferrosos expuestos a la humedad y en presencia del aire a la temperatura ambiente.

El objetivo de este estudio es el análisis de herrumbres, para determinar constituyentes en estas. Para esto se ha contado con el método de difracción de rayos X.

La difracción de rayos X se realiza con un difractómetro, el cual para su lectura está basado en la Ley de Bragg ($n=2d\text{Sen}\theta$), permitiendo así identificar constituyentes cristalinos [66].

Para este estudio se recogieron las escorias de los tachos de almacenamiento y los tachos de sedimentación del jugo de caña, evitando tener contacto directo con las manos para evitar posibles errores en los análisis, las escorias fueron trituradas a través de un mortero y un pistilo como se muestra en la figura.



Figura 5.29. Trituración de las escorias.

Las escorias fueron tamizadas, a través de un tamiz de 0,2 mm, se procedió a pesar las muestras para proceder a ser analizadas.

5.5.1. Análisis químico de Herrumbres

Muestra 1: Herrumbre proveniente de los tachos de almacenamiento del jugo de caña.

Anexo E

TABLA 5.16. ANÁLISIS QUÍMICO DE HERRUMBRES I

| Determinaciones | Unidades | Resultados |
|---|----------|------------|
| Oxido de Sílice (SiO ₂) | % | 8,48 |
| Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃) | % | 1,99 |
| Óxido de Hierro III (Fe ₂ O ₃) | % | 60,71 |
| Oxido de Calcio (CaO) | % | 3,74 |
| Oxido de Magnesio (MgO) | % | 0,39 |
| Oxido de Sodio (Na ₂ O) | % | 0,72 |
| Oxido de Potasio (K ₂ O) | % | 0,36 |
| Oxido de Titanio (TiO ₂) Sílice (SiO ₂) | % | 0,23 |
| Perdida por calcinación | % | 14,39 |
| Humedad | % | 8,67 |

Muestra 2: Herrumbre proveniente de los tachos de clarificación

Anexo F

TABLA 5.17. ANÁLISIS QUÍMICO DE HERRUMBRES II

| Determinaciones | Unidades | Resultados |
|---|----------|------------|
| Oxido de Sílice (SiO ₂) | % | 6,40 |
| Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃) | % | 1,65 |
| Óxido de Hierro III (Fe ₂ O ₃) | % | 57,10 |
| Oxido de Calcio (CaO) | % | 4,59 |
| Oxido de Magnesio (MgO) | % | 0,18 |
| Oxido de Sodio (Na ₂ O) | % | 0,67 |
| Oxido de Potasio (K ₂ O) | % | 0,29 |
| Oxido de Titanio (TiO ₂) Sílice (SiO ₂) | % | 0,04 |
| Perdida por calcinación | % | 19,64 |
| Humedad | % | 8,52 |

5.6. Criterios de Selección.

A partir de cualquier punto de vista los materiales metálicos son los que principalmente se eligen para aplicaciones de ingeniería en virtud de sus características. Estas características son su capacidad para satisfacer los requisitos de ingeniería del componente o pieza con sus propiedades físicas y mecánicas.

Los atributos de un material que son importantes en el diseño de estructuras son los siguientes: módulo de Young, esfuerzo de fluencia, razón de esfuerzo de fluencia a esfuerzo máximo de fluencia, ductilidad, tenacidad a la fractura, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, fabricabilidad (que puede incluir conformado, soldadura y maquinado) y disponibilidad y costo.

Se deben elegir los materiales en función de los posibles mecanismos de falla, los tipos de cargas y de esfuerzos y las condiciones ambientales, como la temperatura y el ambiente de corrosión, a las que es probable que los materiales estén expuestos [56].

Se debe hacer un análisis del proceso de refinación del azúcar desde la caña como materia prima hasta el azúcar como producto final.

5.7. Descripción del proceso de la elaboración del azúcar o panela granulada

5.7.1. Cosecha y transporte.

El ciclo de cultivo de la caña es de 12 a 13 meses edad en la cual es cosechada a través de corte manual, la caña es transportada en carretas que son haladas a través de equinos hasta la fábrica para su almacenamiento.

5.7.2. Pesaje y almacenamiento.

Antes de que la caña entre al patio de almacenamiento es pesada para efectos de control y contabilidad.

5.7.3. Preparación de la caña.

La caña antes de ser llevada al molino (trapiche) es limpiada y lavada, retirando los residuos de arcilla y las raíces y hojas de la caña.

5.7.4. Extracción del jugo.

La caña es picada previamente antes de ser molida con este procedimiento se logra extraer la mayor parte del jugo contenido en la caña, una vez molida la caña al bagazo se le agrega agua caliente para extraer al máximo la sacarosa que contiene el material fibroso (bagazo). Una vez extraído el jugo pasa por un tamiz que recoge el bagasillo los cuales se depositan en una bagacera, el bagazo por su alto poder calorífico es utilizado como leña en la caldera para producir el vapor de alta presión para mover el turbogenerador eléctrico, el jugo pasa a través de los tubos y canaletes hasta el tacho de almacenamiento.

5.7.5. Clarificación.

Una vez en el tacho de almacenamiento, el jugo se transporta por dos bombas centrifugas conectadas en paralelo hasta los tachos de clarificación, el jugo es tratado con lechada de cal con el objetivo de elevar el pH disminuyendo la pérdida de sacarosa, ayudando a precipitar las impurezas en forma de lodo o cachaza, el jugo claro queda en la parte superior del tanque, el jugo sobrante se utiliza para producir suplementos nutricionales para animales y como fertilizante de suelos por su alto valor nutritivo, se eleva la temperatura del jugo mediante un sistema de tubos calentadores hasta una temperatura que oscila entre los 90 y 114°C.

5.7.6. Evaporación.

El jugo procedente del sistema de clarificación se recibe en los evaporadores con un porcentaje de sólidos solubles entre 10 y 12% y se obtiene una meladura o jarabe con una concentración aproximada de sólidos solubles del 55 al 60%.

Este proceso se da en evaporadores de múltiples efectos al vacío, que consisten en un conjunto de celdas de ebullición dispuestas en serie. El jugo entra primero en el preevaporador y se calienta hasta el punto de ebullición. Al comenzar a ebullición se generan vapores los cuales sirven para calentar el jugo en el siguiente efecto, logrando así el menor punto de ebullición en cada evaporador.

5.7.7. Clarificación de meladura.

La meladura que sale de los evaporadores se calienta a 80°C y se bombea a un tanque de reacción en donde se agrega ácido fosfórico, Sacarato de Calcio y Floculante. Esta

meladura pasa a través de un aireado para luego ingresar a un clarificador de meladura en el cual por flotación se eliminan las impurezas.

5.7.8. Cristalización y cocimiento.

La meladura clarificadora es enviada a los tachos para su cocimiento y cristalización, los tachos funcionan al vacío, aquí se concentra la meladura hasta un punto de saturación y se alimenta polvo de azúcar en suspensión con alcohol izopropílico, para la formación del grano luego este va desarrollándose con alimentación de meladura formándose una masa densa que descarga en los cristalizadores.

5.7.9. Centrifugación.

La masa cocida se separa de la miel por medio de centrifugas, obteniéndose azúcar cruda o mascabada, miel de segunda o sacarosa líquida y una purga de segunda o melaza. El azúcar mascabado debe su color café claro al contenido de sacarosa que aún lo tiene.

5.7.10. Secado.

El secador elimina la humedad de azúcar hasta un rango máximo de 0,03 a 0,055% partes de agua por partes de azúcar seca, luego el azúcar seca pasa por un tamiz para separar el azúcar de los grumos formados por el secado, denominados caramelos de azúcar, el caramelo se lo envía al disolutor para reprocesarlo y el azúcar continúa el proceso de envase y almacenamiento.

5.7.11. Envase.

Una vez el azúcar este seco y frío, es empacado en sacos de diferentes presentaciones según las necesidades de los clientes nacionales [56].

5.8. Selección de materiales.

5.8.1. Selección de materiales para los tachos de almacenamiento y los tachos de clarificación del jugo de caña.

Se escogió dos alternativas de materiales el acero AISI 1015 y el acero inoxidable AISI 304, con el objetivo de conocer su comportamiento frente a un medio agresivo como lo es el jugo de caña.

Previo al análisis de la tasa de corrosión es necesario conocer mediante el diagrama de Pourbaix la agresividad del jugo de caña conforme su pH y el potencial electrodo del metal y determinar teóricamente si el metal se encuentra en la zona de inmunidad, en la zona de corrosión ó en la zona de pasivación.

- El pH del jugo de de caña es 5,32.
- El potencial electrodo del Fe^{2+} es -0,44.
- El potencial electrodo del Cr^{3+} es -0,74.



Figura 5.30. Determinación de la agresividad del fluido con el material.

Como se puede observar en el diagrama de Pourbaix, el Fe^{2+} de acuerdo al pH del jugo de caña se encuentra en la zona de corrosión, El Cr^{3+} se encuentra en la de inmunidad.

El acero al carbono AISI 1015 de acuerdo a los resultados obtenidos, no satisface las necesidades para ser utilizado exponiéndolo al jugo de caña al tener una alta tasa de corrosión y consecuentemente contaminar la composición del azúcar con las partículas de óxido de hierro producto de la corrosión.

El acero inoxidable AISI 304 posee buenas características de protección contra la corrosión por el jugo de caña y la humedad de la localidad, resiste casi todos los ácidos oxidantes, muchas soluciones esterilizadoras, la mayor parte de los compuestos químicos orgánicos y colorantes, y una amplia variedad de compuestos químicos inorgánicos.

5.8.2. Selección de tuberías.

Se debe utilizar tuberías de acero inoxidable AISI 304 para transportar el jugo de caña del tacho de almacenamiento a los tachos de clarificación, por ser un fluido muy agresivo con aceros de bajo carbono.

Se debe utilizar tuberías de acero galvanizado para las tuberías que transportan agua desde el estanque de almacenamiento de agua hacia el caldero y desde el caldero hacia los evaporadores.

Se debe utilizar tuberías de acero galvanizado desde los tachos de clarificación hasta los evaporadores considerando que al jugo de caña se le agrega lechada de cal para la separación de impurezas, esta solución actúa como inhibidor para el material aumentando su pH y disminuyendo la agresividad del fluido.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones.

- ✓ El jugo de caña posee un alto índice de acidez y alta conductividad eléctrica, al tener este medio contacto con el metal este influye de manera negativa sobre él presentando problemas de corrosión en sus diferentes manifestaciones.
- ✓ Realizados los ensayos de corrosión se puede observar claramente en la gráficas que la rata de corrosión del acero AISI 1015 en contacto con el jugo de caña tiene la tendencia a crecer con el tiempo, esto se debe principalmente a que el acero tiene un potencial electrodo negativo y el jugo de caña conserva un pH acido.
- ✓ La rata de corrosión del acero inoxidable AISI 304 como se observa en la gráfica tiene la tendencia a decrecer con el tiempo debido a la película de óxido de cromo que actúa inmunizando al material de los efectos corrosivos del jugo de caña.
- ✓ La humedad relativa de la localidad es alta, actuando de manera negativa sobre los metales sin ningún recubrimiento especial, presentando problemas de corrosión en sus diferentes manifestaciones como son: uniforme, localizada, electroquímica.
- ✓ La lechada de cal añadida al jugo de caña para filtrarlo y separar las impurezas actúa como un inhibidor para el material, disminuyendo la acidez del jugo de caña y llevando al material hasta la zona de pasivación.
- ✓ Con los resultados de los análisis químicos de agua y de acuerdo a los índices de corrosividad, el agua utilizada en el micro ingenio ASPROCA presenta tendencia a la corrosión, provocando problemas de corrosión por oxígeno en forma de pitting tanto en el caldero como en las tuberías transportadoras de agua.
- ✓ Realizados los análisis químicos de escorias se observó que las herrumbres presentan un alto contenido de óxido de hierro y un alto contenido de óxido de sílice, llegando a la conclusión de que tanto los tachos de almacenamiento y los tachos de clarificación presentan problemas de corrosión por erosión, debido la presencia de sólidos suspendidos

en el jugo de caña y a la alta velocidad del jugo proporcionada por las bombas centrifugas provocando la presencia de burbujas de gas; removiendo cualquier película protectora dejando la superficie metálica expuesta a la corrosión.

6.2. Recomendaciones:

- ✓ Se recomienda la utilización de un acero inoxidable AISI 304 para la fabricación de los tachos de almacenamiento y los tachos de sedimentación del jugo de caña, al tener buenas propiedades mecánicas y muy buena resistencia a la corrosión por el jugo de caña, mejorando las condiciones de calidad e higiene del azúcar y panela granulada elaborado en el micro ingenio ASPROCA.
- ✓ Se recomienda instalar una planta para proporcionar el tratamiento necesario al agua antes de ser utilizada en el caldero neutralizando los agentes corrosivos que contiene, disminuyendo los problemas de corrosión existentes. Es necesario la adición de secuestrantes de oxígeno en la piscina de almacenamiento del agua, por la alta concentración de oxígeno presente.
- ✓ Se recomienda mejorar el procedimiento de limpieza de la caña de azúcar antes llevarla al proceso de molienda, disminuyendo la cantidad de partículas de óxido de sílice y disminuyendo la cantidad de bacterias y microorganismos presentes en el jugo de caña.
- ✓ Se recomienda mejorar el drenaje de la planta evitando la acumulación del agua que influye de manera negativa sobre la vida útil de los equipos del micro ingenio.

BIBLIOGRAFÍA

AVNER, S. Introducción a la Metalurgia Física. 2da.ed. México: Mcgraw- Hill, 1985.

BARDAL, E. Corrosion and Protection. London: Springer, 2003.

CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994.

HAMROCK, B. Elementos de Máquinas. México: McGraw- Hill, 2000.

IGLESIAS- MORALES. Diseño de un Sistema de Protección Catódica para Tanques de Almacenamiento de Combustibles. Riobamba: ESPOCH, 1998.(tesis).

MIRANDA LUIS. La Influencia del CO₂ en la Corrosión de Oleoductos Secundarios de Petroproducción. Riobamba: ESPOCH, 2009.(tesis).

LASHERAS, J. Materiales Industriales. España: Cedel, 1981.

PIERRE, R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1999.

ROMERO, J. Calidad del Agua. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002.

SHIGLEY, J. Diseño en Ingeniería Mecánica. 5ta.ed. México: Mcgraw-Hill, 1985.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion.html>
- [2] www.sabelotodo.org/metalurgia/corrosion.html
- [3] IGLESIAS- MORALES. Diseño de un Sistema de Protección Catódica para Tanques de Almacenamiento de Combustibles. Riobamba: ESPOCH, 1998. (tesis). pp.3
- [4] PIERRE, R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1999. pp.14
- [5] PIERRE, R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw- Hill, 1999, pp.15
- [6] AVNER, S. Introducción a la Metalurgia Física. 2da.ed. Mexico: McGraw-Hill, 1985.
- [7] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_5.htm
- [8] GALVELE, J. Secretaria General de la Organización de los Estados Unidos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington D.C: 1979.
- [9]<http://www.wilsonwalton.es>
- [10] Ingenio Riopaila, 2002
- [11] Palacio, 1956
- [12] www.infoagro.com/instrumentos.../doc_ph.asp?k
- [13]: fermarin@ingeniomayaguez.com.
- [14]http://www.inazucar.gov.do/obtension_azucar.htm.
- [15] Ingenio Mayagüez, 2007
- [16] : Filho et al., 2006, citado por Ospina, et al.2007

- [17] Soil Net.2006, citado por Ospina et al, 2007
- [18] TESIS IGLESIAS- MORALES. Diseño de un Sistema de Protección Catódica para Tanques de Almacenamiento de Combustibles. Riobamba: ESPOCH, 1998.(tesis) pp.6
- [19] <http://www.lenntech.es/ph-y-alcaldinidad.htm#ixzz1Od0Rs5T4>
- [20] <http://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm#ixzz1Od3JyWIT>.
- [21] <http://materias.fi.uba.ar/6303/TPN3.pdf>
- [22] PIERRE, R. Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1999. pp.334
- [23] Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater. 19TH ed.... 1995
- [24] Guía NALCO.PAG 120-150.
- [25] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.54
- [26] <http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion/tipos>
- [27] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.58
- [28] <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8234/1/CorrTema8.pdf>
- [29] NALCO. Corrosión en la Industria Petrolera. U.S.A. Texas: 2007. Pp.2-3
- [30] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.59
- [31] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.59
- [32] BARDAL, E. Corrosion and Protection. London: Springer, 2003. pp.123
- [33] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.63
- [34] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.69
- [35] BARDAL, E. Corrosion and Protection. London: Springer, 2003. pp.139

- [36] BARDAL, E. Corrosion and Protection. London: Springer, 2003. pp.139
- [37] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.70
- [38] BARDAL, E. Corrosion and Protection. London: Springer, 2003. pp.141
- [39] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.73
- [40] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.75-78
- [41] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.82-85
- [42] CABRERA, R. Texto Corrosión. Ecuador: Edicentro, 1994. pp.46
- [43] <http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/oxidacion.php>
- [44] http://html.rincondelvago.com/corrosion_3.html
- [45] <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>
- [46] <http://www.utp.edu.co/~publio17/metales.htm>
- [47] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f9/Diagrama_Fe_C_zona_de_los_aceros.svg/300px-Diagrama_Fe_C_zona_de_los_aceros.svg.png
- [48] http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_inox.htm
- [49] http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-08881999000100001
- [50] <http://www.uhu.es/beatriz.aranda/apuntesciemat/CLASES%20DE%20TRATAMIENTOS.pdf>
- [51] LASHERAS, J. Materiales Industriales. España: Cedel, 1981. pp.392-393
- [52] AVNER, S. Introducción a la Metalurgia Física. 2da.ed. México: McGraw-Hill.1985.pp.254-257
- [53] LASHERAS, J. Materiales Industriales. España: Cedel, 1981. pp.392-393
- [54] AVNER, S. Introducción a la Metalurgia Física. 2da.ed. México: McGraw-Hill, 1985. pp.316-335

- [55] <http://www.ateg.es/frpropiedades.htm>
- [56] <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/791/2/CAPITULO1.pdf>
- [57] [NormasParaLaSeleccionDeAceros.htm](#)
- [58] ROMERO, J. Calidad del Agua. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002. p.153-156
- [59] <http://www.monografias.com/trabajos72/tendencias-agresiva-corrosiva-agua-potable/tendencias-agresiva-corrosiva-agua-potable2.shtml>
- [60] Edstrom Industries, 1998. Scale Forming Tendency of Water. Internet website www.edstrom.com/lab/bulletins/mi4710.thm.
- [61] www.leonghuat.com/.../carbon%20equivalent.thm
- [62] AMERICAN SOCIETY FOR METAL. METALS HANDBOOK. Atlas of Microstructures of Industrial Alloy. 8th .ed. USA: Metals Park, 1972 pp.17-28
- [63] <http://msr-construccion.blogspot.com/2010/02/23-evaluacion-de-la-corrosion-interna.html>
- [64] NACE International. Preparación, instalación, análisis e interpretación de cupones de corrosión en operaciones de campo. Houston.2005.
- [65] <http://es.answers.yahoo.com/question/index?qid=20090914122933AAzjsnm>
- [66] <http://ingenieria.udea.edu.co/grupos/corrosion/investigacion/proy/p911.htm>

LINKOGRAFÍA

Corrosión

www.textoscientificos.com

2011-01- 10

Corrosión en materiales metálicos

www.sabelotodo.org

2011-01-10

Serie electroquímica de los metales

www.bibliotecadigital.ile.edu.com

Fecha: 2011-01-11

Diagrama de Pourbaix

wilsonwalton.es

2011-01-20

Composición química del jugo de caña

www.inazucar.gov.com

2011-01-30

Corrosividad del agua

<http://www.lenntech.es>

2011-01-30

Clasificación de los aceros

www.utp.edu.com

2011-03-27