

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LOS ACEROS  
INOXIDABLES**

**FÉLIX LEONEL PALACIOS DURAN COD. 0203853**

**JHON JAIRO VEGA PUELLO COD. 9703510**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
MINOR DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C. DE LA HUMANIDAD  
MAYO 28 DE 2004**

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LOS ACEROS  
INOXIDABLES**

**FÉLIX LEONEL PALACIOS DURAN COD. 0203853**

**JHON JAIRO VEGA PUELLO COD. 9703510**

**DIRECTOR:**

**ING. BENJAMIN ARANGO ZABALETA**

**Monografía, presentada como requisito para optar al título de Ingeniero  
Mecánico.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
MINOR DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C. DE LA HUMANIDAD  
MAYO 28 DE 2004**

**ARTICULO 107 DEL REGLAMENTO ACADÈMICO DE LA UNIVERSIDAD  
TECNOLÒGICA DE BOLIVAR.**

La universidad se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados, los cuales no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

Cartagena de Indias D.T. y C., Mayo 28 de 2004

Señores:

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

La ciudad

Cordial Saludo.

Mediante la presente, autorizo la utilización en las bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar y la publicación en la Internet con fines exclusivamente académicos de la monografía ***“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LOS ACEROS INOXIDABLES”***, realizada por Félix Leonel Palacios Durán y Jhon Jairo Vega Puello, como requisito parcial para optar el título de Ingenieros Mecánicos. Para mayor constancia se firma y autentica este documento.

Cordialmente,

---

Félix Leonel Palacios Durán

CC. 3'806.946 de Cartagena

Cartagena de Indias D.T. y C., Mayo 28 de 2004

Señores:

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

La ciudad

Cordial saludo.

Mediante la presente, autorizo la utilización en las bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar y la publicación en la Internet con fines exclusivamente académicos la monografía ***“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSION EN ACEROS INOXIDABLES”***, realizada por Félix Leonel Palacios Durán y Jhon Jairo Vega Puello, como requisito parcial para optar el título de Ingenieros Mecánicos. Para mayor constancia se firma y autentica este documento.

Cordialmente,

---

Jhon Jairo Vega Puello

CC. 73'583.360 de Cartagena

*Dedico este trabajo a Dios por darme fuerza para seguir adelante, a mis Padres y mis Hermanas por el apoyo que me brindaron, por la confianza que tuvieron en mi para el logro de esta meta.*

**FELIX LEONEL**

*Dedico este trabajo a Dios, por darme fuerza y sabiduría a la hora de enfrentar los obstáculos que se me presentaron.*

*A mis Padres, por darme Amor, Cariño, Comprensión, Sabios Concejos y todo su Apoyo.*

*A mi hermana por su Amor y Apoyo en todo momento.*

*A mis Profesores por su Paciencia y por transmitirme sus conocimientos y a mis compañeros por su apoyo.*

**JHON JAIRO**

## **AGRADECIMIENTO**

*Para el desarrollo de nuestra Monografía contamos con dos personas que siempre nos aportaron su conocimientos, nos alentaron y animaron para seguir adelante.*

*Con su incondicional colaboración nos demostraron que la perseverancia es muy importante para lograr nuestras metas y que vale la pena sacrificarse para conseguirlas .*

*A ellos le estamos muy agradecidos*

***Ing. Víctor Raúl Feria Hoyos***

***Ing. José Andrés Sánchez Arévalo***



Cartagena de Indias, Mayo 28 de 2004.

Señores:

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**Aten. COMITÉ EVALUADOR DE PROYECTOS DE GRADO**

Ciudad.

Cordial saludo.

Por medio de la presente hago constar que dirigí, la elaboración de la monografía titulada **“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LOS ACEROS INOXIDABLES”**, desarrollada por los estudiantes de la facultad de ingeniería Mecánica Félix Leonel Palacios Durán y Jhon Jairo Vega Puello, cumpliendo así con los requisitos exigidos por la universidad para la obtención del título profesional.

Agradeciendo de antemano la atención prestada.

Cordialmente,

---

Ing. Benjamín E. Arango Zabaleta

Director Monografía

Cartagena de Indias, Mayo 28 de 2004.

Señores:

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**Aten. COMITÉ EVALUADOR DE PROYECTOS DE GRADO**

La Ciudad.

Estimados señores:

De manera más atenta presento a ustedes la monografía titulada ***“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LOS ACEROS INOXIDABLES.”*** como requisito para culminar el proceso académico y obtener el título Profesional de Ingeniero Mecánico.

Esperamos que cumpla con las normas establecidas por la Universidad.

Agradeciendo de antemano la atención prestada.

Cordialmente,

---

Félix Leonel Palacios Durán

CC. 3'806.946 de Cartagena

Cartagena de Indias, Mayo 28 de 2004.

Señores:

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**Aten. COMITÉ EVALUADOR DE PROYECTOS DE GRADO**

La Ciudad.

Estimados señores:

De manera más atenta presento a ustedes la monografía titulada **“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LOSACEROS INOXIDABLES.”** como requisito para culminar el proceso académico y obtener el título Profesional de Ingeniero Mecánico.

Esperamos que cumpla con las normas establecidas por la Universidad.

Agradecimiento de antemano la atención prestada.

Cordialmente,

---

Jhon Jairo Vega Puello

CC. 73'583.360 de Cartagena

**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Fecha,** \_\_\_\_\_

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C. DE LA HUMANIDAD**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>27</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>30</b>
<b>1. CORROSIÓN</b>	<b>32</b>
1.1. DEFINICIÓN	32
1.2. MEDIOS CORROSIVOS	33
1.3. DAÑOS POR CORROSIÓN	33
1.4. CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN	33
1.5. TIPOS DE CORROSIÓN	34
1.5.1. CORROSIÓN GENERAL	35
1.5.2. CORROSIÓN LOCALIZADA	36
1.5.2.1. Corrosión Gálvanica	37
1.5.2.2. Corrosión en Grietas	38
1.5.2.3. Corrosión Filiforme	38
1.5.2.4. Corrosión por Picadura	39
1.5.2.5. Corrosión Íntergranular	41
1.5.2.6. Corrosión Disolución Selectiva	42

	<b>Pág.</b>
<b>1.5.2.7. Corrosión por Erosión</b>	<b>43</b>
<b>1.5.2.8. Corrosión por Cavitación</b>	<b>44</b>
<b>1.5.2.9. Corrosión por Fricción</b>	<b>44</b>
<b>1.5.2.10. Corrosión Bajo Tensión</b>	<b>45</b>
<b>1.5.2.11. Corrosión por Daños de Hidrógeno</b>	<b>46</b>
<b>1.5.2.12. Corrosión por Fatiga</b>	<b>47</b>
<b>1.5.2.13. Corrosión Microbiana</b>	<b>48</b>
<b>1.5.2.14. Corrosión por Corrientes Desviadas</b>	<b>49</b>
<b>1.5.2.15. Corrosión por Altas Temperaturas</b>	<b>50</b>
<b>1.6. CONTROL DE LA CORROSIÓN</b>	<b>50</b>
<b>1.6.1. BUENA SELECCIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>51</b>
<b>1.6.1.1. Materiales Metálicos</b>	<b>52</b>
<b>1.6.1.2. Materiales no metálicos</b>	<b>52</b>
<b>1.6.2. USO DE INHIBIDORES</b>	<b>53</b>
<b>1.6.3. USO DE PASIVADORES</b>	<b>54</b>
<b>1.6.4. ALTERACIÓN DEL MEDIO CORROSIVO</b>	<b>55</b>
<b>1.6.5. PROTECCIÓN ANÓDICA</b>	<b>55</b>
<b>1.6.6. PROTECCIÓN CATÓDICA</b>	<b>56</b>
<b>1.6.7. DISEÑO ANTICORROSIVO</b>	<b>57</b>
<b>1.6.8. RECUBRIMIENTOS METÁLICOS</b>	<b>57</b>
<b>1.6.9. RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS</b>	<b>58</b>

	<b>Pág.</b>
<b>1.6.10. RECUBRIMIENTOS INORGÁNICOS</b>	<b>58</b>
<b>2. ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>59</b>
<b>2.1. HISTORIA DE LOS ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>59</b>
<b>2.2. DEFINICIÓN</b>	<b>60</b>
<b>2.3. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN</b>	<b>61</b>
<b>2.3.1. CROMO</b>	<b>61</b>
<b>2.3.2. NIQUEL</b>	<b>62</b>
<b>2.3.3. COBRE</b>	<b>63</b>
<b>2.3.4. ALUMINIO</b>	<b>63</b>
<b>2.3.5. SILICIO</b>	<b>63</b>
<b>2.3.6. MOLIBDENO</b>	<b>64</b>
<b>2.3.7. NIOBIO</b>	<b>64</b>
<b>2.3.8. TITANIO</b>	<b>64</b>
<b>2.3.9. MAGNESIO</b>	<b>64</b>
<b>2.4. NOMENCLATURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>63</b>
<b>2.4.1. NOMENCLATURA AISI/SAE</b>	<b>67</b>
<b>2.4.2. SISTEMA UNS</b>	<b>69</b>
<b>2.5. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>70</b>
<b>2.6. CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>73</b>

	<b>Pág.</b>
<b>2.6.1. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS</b>	<b>73</b>
2.6.1.1. Generalidades	73
2.6.1.2. Propiedades Mecánicas	78
2.6.1.3. Resistencia a la Corrosión	79
<b>2.6.2. ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS</b>	<b>80</b>
2.6.2.1. Generalidades	80
2.6.2.2. Propiedades Mecánicas	83
2.6.2.3. Resistencia a la Corrosión	84
<b>2.6.3. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS</b>	<b>85</b>
2.6.3.1. Generalidades	85
2.6.3.2. Propiedades Mecánicas	87
2.6.3.3. Resistencia a la Corrosión	88
<b>2.6.4. ACEROS INOXIDABLES DUPLEX</b>	<b>89</b>
2.6.4.1. Generalidades	89
2.6.4.2. Propiedades Mecánicas	93
2.6.4.3. Resistencia a la Corrosión	95
<b>2.6.5. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN</b>	<b>95</b>
2.6.5.1. Generalidades	95
<b>2.6.6. ACEROS ESPECIALES</b>	<b>96</b>
2.6.6.1. Generalidades	96



	<b>Pág.</b>
<b>3. TIPOS DE CORROSIÓN QUE AFECTAN A LOS ACEROS</b>	
<b>INOXIDABLES</b>	<b>99</b>
<b>3.1. CORROSIÓN UNIFORME</b>	<b>99</b>
<b>3.2. CORROSION INTERGRANULAR</b>	<b>99</b>
<b>3.3. CORROSIÓN POR PICADURA</b>	<b>101</b>
<b>3.4. CORROSIÓN POR GRIETAS</b>	<b>103</b>
<b>3.5. CORROSIÓN GALVÁNICA</b>	<b>103</b>
<b>3.6. CORROSIÓN BAJO TENSIÓN</b>	<b>104</b>
<b>3.7. CORROSIÓN POR EROSIÓN</b>	<b>105</b>
<b>3.8. CORROSIÓN POR CAVITACIÓN</b>	<b>106</b>
<b>3.9. CORROSIÓN POR DAÑOS DE HIDROGENO</b>	<b>106</b>
<b>3.10. CORROSIÓN POR FATIGA</b>	<b>107</b>
<b>4. PRUEBAS Y ENSAYOS DE CORROSIÓN EN ACEROS</b>	
<b>INOXIDABLES</b>	<b>108</b>
<b>4.1. ENSAYO HUEY PARA ACERO INOXIDABLE</b>	<b>108</b>
<b>4.2. ENSAYO STREICHER PARA ACERO INOXIDABLE</b>	<b>108</b>
<b>4.3. ENSAYO WARREN</b>	<b>109</b>
<b>4.4. ENSAYO DE CORROSIÓN INTERGRANULAR</b>	
<b>PARA CAÑERIAS</b>	<b>110</b>

	<b>Pág.</b>
<b>5. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>111</b>
5.1. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS	111
5.2. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS	115
5.3. ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS	116
5.4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS	117
5.4.1. RECOCIDO DE SOLUBILIZACIÓN	117
5.4.2. SENSIBILIZACIÓN	118
5.4.2.1. Teorías de Sensibilización	118
5.4.2.2. Remedios posibles contra la Sensibilización	119
5.4.3. RECOCIDO DE ELIMINACIÓN DE TENSIONES	120
5.4.4. ESTABILIZACIÓN	120
5.4.5. RECRISTALIZACIÓN	121
5.4.6. TEMPLE	121
5.4.7. ENVEJECIMIENTO	122
<b>6. COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA EN LOS ACEROS INOXIDABLES.</b>	 <b>125</b>
6.1. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS	126
6.2. ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS	126
ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS	128

	<b>Pág.</b>
<b>6.3. ACEROS INOXIDABLES DUPLEX</b>	<b>130</b>
<b>6.4. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN</b>	<b>130</b>
<b>7. SELECCIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>133</b>
<b>7.1. CONDICIONES FAVORABLES PARA EL USO DE ACEROS INOXIDABLES</b>	<b>133</b>
<b>8. INSPECCIÓN</b>	<b>135</b>
<b>8.1. TECNICAS DE INSPECCIÓN SUPERFICIAL</b>	<b>136</b>
<b>8.1.1. INSPECCIÓN VISUAL</b>	<b>136</b>
<b>8.1.2. LÍQUIDOS PENETRANTES</b>	<b>137</b>
<b>8.1.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS</b>	<b>138</b>
<b>8.1.4. ELECTROMAGNETISMO</b>	<b>139</b>
<b>8.2. TÉCNICAS DE INSPECCIÓN VOLUMÉTRICAS</b>	<b>140</b>
<b>8.2.1. RADIOLOGÍA INDUSTRIAL</b>	<b>140</b>
<b>8.2.2. ULTRASONIDO INDUSTRIAL</b>	<b>141</b>
<b>8.3. TÉCNICAS DE EVALUACION DE CORROSIÓN</b>	<b>142</b>
<b>8.3.1. DETERMINAR LOS PRODUCTOS CORROSIVOS EN EL SISTEMA</b>	<b>143</b>

	<b>Pág.</b>
<b>8.3.2. INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE PRUEBAS Ó NIPPLES DE CORROSIÓN</b>	<b>144</b>
<b>8.3.3. INSTALACIÓN DE CUPONES DE CORROSIÓN</b>	<b>144</b>
<b>8.3.4. MEDICIONES DE RATAS DE CORROSIÓN</b>	<b>145</b>
<b>8.3.5. RESISTENCIA ELÉCTRICA</b>	<b>145</b>
<b>8.3.6. RESISTENCIA INDUCTIVA</b>	<b>146</b>
<b>8.3.7. RESISTENCIA DE POLARIZACION LINEAL</b>	<b>148</b>
<b>8.3.8. ESPECTROSCOPIA ELECTROQUIMICA DE LA IMPEDANCIA</b>	<b>148</b>
<b>8.3.9. ANÁLISIS ARMONICO</b>	<b>148</b>
<b>8.3.10. RUIDO ELECTROMAGNETICO</b>	<b>149</b>
<b>8.3.11. ACTIVACIÓN DE LA CAPA DELGADA</b>	<b>150</b>
<b>8.3.12. EMISION ACUSTICA</b>	<b>150</b>
<b>8.3.13. MONITOREO DE POTENCIAL DE CORROSION</b>	<b>151</b>
<b>8.3.14. ANÁLISIS QUIMICO</b>	<b>152</b>
<b>8.4. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA PARA SOLDADURAS</b>	<b>152</b>
<b>8.4.1. GENERALIDADES</b>	<b>152</b>
<b>8.4. 2. DISCONTINUIDADES</b>	<b>153</b>
<b>8.4.1.1. Porosidad</b>	<b>153</b>
<b>8.4.1.2. Inclusiones De Escorias</b>	<b>154</b>
<b>8.4.1.3. Inclusiones De Tungsteno</b>	<b>154</b>
<b>8.4.1.3. Fusión Incompleta</b>	<b>154</b>

	<b>Pág.</b>
<b>8.4.1.4. Penetración Incompleta De La Unión</b>	<b>155</b>
<b>8.4.1.5. Socavado</b>	<b>155</b>
<b>8.4.1.6. Concavidad</b>	<b>155</b>
<b>8.4.1.7. Traslapadura</b>	<b>156</b>
<b>8.4.1.8. Laminaciones</b>	<b>156</b>
<b>8.4.1.9. Delaminaciones</b>	<b>156</b>
<b>8.4.1.10. Costuras Y Traslapes</b>	<b>157</b>
<b>8.4.1.11. Desgarre Laminar</b>	<b>157</b>
<b>8.4.1.12. Grietas</b>	<b>157</b>
<b>8.4.1.13. Garganta Insuficiente</b>	<b>157</b>
<b>8.4.1.14. Convexidad Y Refuerzo De Soldadura</b>	<b>158</b>
<b>8.4.1.15. Cateto Insuficiente</b>	<b>158</b>
<b>8.5. METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA INSPECCIONAR SOLDADURAS</b>	<b>158</b>
<b>8.5.1. INSPECCIÓN VISUAL</b>	<b>159</b>
<b>8.5.2. INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES</b>	<b>160</b>
<b>8.5.3. INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS</b>	<b>160</b>
<b>8.5.4. INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA</b>	<b>161</b>
<b>8.5.5. INSPECCIÓN ULTRASÓNICA</b>	<b>162</b>
<b>8.5.6. INSPECCIÓN POR CORRIENTES DE EDDY</b>	<b>162</b>

	<b>Pág.</b>
<b>9. PLANES DE INSPECCIÓN Y ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>164</b>
<b>9.1. INSPECCIÓN DE TUBERIA POR DONDE FLUYE CLORO SECO</b>	<b>164</b>
<b>9.1.1. PLAN DE INSPECCIÓN</b>	<b>164</b>
<b>9.1.2. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>165</b>
<b>9.2. INSPECCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR</b>	<b>169</b>
<b>9.2.1. PLAN DE INSPECCIÓN</b>	<b>169</b>
<b>9.2.2. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>173</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>175</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>177</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>178</b>

## LISTA DE CONTENIDO DE TABLAS

	Pág.
<b>TABLA 1 . Nomenclatura AISI/SAE</b>	<b>68</b>
<b>TABLA 2. Nomenclatura Sistema UNS</b>	<b>69</b>
<b>TABLA 3. Composición Química De Aceros Inoxidables Austeníticos.</b>	<b>77</b>
<b>TABLA 4. Composición Química De Aceros Inoxidables Martensíticos.</b>	<b>83</b>
<b>TABLA 5. Composición Química De Aceros Inoxidables Ferríticos.</b>	<b>86</b>
<b>TABLA 6. Composición Química De Aceros Inoxidables Duplex.</b>	<b>93</b>
<b>TABLA 7. Composición Química De Aceros Inoxidables Endurecidos Por Precipitación.</b>	<b>96</b>

## LISTA DE CONTENIDO DE FOTOS

	Pág.
FOTO 1. Ejemplo de Corrosión Uniforme	35
FOTO 2. Ejemplo de Corrosión Galvánica	37
FOTO 3. Ejemplo de Corrosión por Grietas	38
FOTO 4. Ejemplo de Corrosión Filiforme	39
FOTO 5. Ejemplo de Corrosión por Picadura	40
FOTO 6. Ejemplo de Corrosión Íntergranular	42
FOTO 7. Ejemplo de Corrosión Disolución Selectiva	43
FOTO 8. Ejemplo de Corrosión Bajo Tensión	46
FOTO 9. Ejemplo de Corrosión por daños de hidrógeno	47
FOTO 10. Ejemplo de Corrosión por Fatiga	48



	<b>Pág.</b>
<b>FOTO 11. Ejemplo de Corrosión Microbiana</b>	<b>49</b>
<b>FOTO 12. Ejemplo de Corrosión Íntergranular en Aceros Inoxidables</b>	<b>70</b>
<b>FOTO 13. Ejemplo de Corrosión Íntergranular de una Soldadura de Acero Inoxidable</b>	<b>101</b>
<b>FOTO 14. Ejemplo de Corrosión Por Picaduras Del Acero Inoxidable</b>	<b>102</b>
<b>FOTO 15. Picadura de Un Acero Inoxidable en un Medio Corrosivo Muy Agresivo</b>	<b>103</b>
<b>FOTO 16. Corrosión Bajo Tensiones del Acero Inoxidable Austenítico en Agua con Cloruro</b>	<b>105</b>

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>ANEXO A. TABLA DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN</b>	<b>179</b>
<b>ANEXO B. RECOMENDACIONES POR TIPO PARA COMBATIR CORROSION</b>	<b>182</b>
<b>ANEXO C. ESPECIFICACIONES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR</b>	<b>184</b>
<b>ANEXO D. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN VISUAL DE SOLDADURA</b>	<b>185</b>
<b>ANEXO E. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO</b>	<b>186</b>
<b>ANEXO F. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN POR PARTICULAS MAGANETICAS</b>	<b>187</b>
<b>ANEXO G. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS</b>	<b>188</b>
<b>ANEXO H. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN DE TINTAS PENETRANTES</b>	<b>189</b>

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico en la producción industrial en general, acepta un desafío a las empresas para los próximos años en las tareas de mantenimiento y un cambio de mentalidad y de actitud hacia esta actividad. La ineficiencia del mantenimiento provoca no sólo roturas y pérdidas económicas directas, sino también pérdidas en rendimiento y capacidad no menos importantes. Es por esto que el mantenimiento mínimo debe garantizar el menor riesgo de roturas y el trabajo más eficiente de las máquinas. La lucha contra la corrosión no puede separarse de las actividades normales del mantenimiento debido a la interacción que existe entre ambos tipos de actividades. Una parte importante de los gastos de mantenimiento está relacionada con problemas de corrosión directa o indirectamente. La protección total de la maquinaria debe asegurar no sólo la preservación contra el ataque corrosivo de las estructuras metálicas, sino también, la protección efectiva de todos sus componentes, incluidos líquidos hidráulicos, grasas, materiales no-metálicos, etc. En elementos sujetos a cargas estáticas continuas y situados en ambientes o entornos corrosivos, en determinado intervalo de tiempo pueden presentar grietas, las cuales originarían la falla del elemento. La aparición de fallas y averías en los equipos de una instalación industrial son las causas principales de ineficiencia.

Las fallas de los equipos siempre tienen una probabilidad de aparición, aunque esta sea muy pequeña y su impacto negativo puede ser mayor o menor, dependiendo de diferentes factores intrínsecos o extrínsecos de la instalación.

En estos elementos las fallas ocurren, por ejemplo, cuando el máximo esfuerzo principal alcanza el esfuerzo de fluencia del material, cuando el esfuerzo cortante máximo es igual al existente en el material, cuando la energía absorbida por volumen unitario es igual a la energía de deformación por volumen unitario del material en fluencia, etc. Cuando la corrosión ocurre vinculada con estos factores mecánicos, la probabilidad de falla en los distintos elementos, dispositivos o máquinas es mayor. Por ejemplo la corrosión causada por la presencia de gases ( $O_2$ ,  $CO_2$ , etc.) y valores de PH bajos pueden favorecer la formación de picaduras. Las fallas por picaduras pueden ocurrir de manera inesperada, y con una pérdida total o mínima del metal.

El método más común para prevenir la corrosión es la selección del metal o de la aleación adecuada, para el determinado servicio en corrosión.

Desafortunadamente este método es mal empleado y cuando se trata de aceros inoxidable es mucho peor. Uno de los errores más comunes con personas que no están familiarizadas con la metalurgia, concierne a la aplicación del acero inoxidable.

El carácter de inoxidable de estos aceros se debe a la habilidad del cromo y otros elementos de aleación, de formar una capa de óxido protectora, en forma instantánea, en una atmósfera oxidante como: aire, agua y otros fluidos que contienen oxígeno.

La resistencia a la corrosión en diversos ambientes agresivos, dependerá de la resistencia de la capa de óxido pasiva, en ese ambiente particular.

El acero inoxidable se utiliza mucho en condiciones corrosivas, pero no resiste en cualquier medio, por ejemplo: en medios que contienen cloruros y estructuras bajo tensión, los aceros inoxidables son menos resistentes que los aceros ordinarios de construcción.

Además, los aceros inoxidables son más susceptibles a una corrosión local, como la corrosión intergranular, por picaduras y corrosión bajo tensión.

Un acero inoxidable mal seleccionado tendrá un desempeño peor que el de otro metal o aleación menos noble, pero con mejor afinidad en el medio corrosivo. En el caso de los aceros inoxidables, también existe corrosión.

Debido a lo anterior se hace necesario el análisis de los efectos de la corrosión en estos elementos y tuberías, para darles un mejor uso mediante una buena selección y garantizar su ciclo de vida mediante buenas estrategias de mantenimiento y un buen plan de inspección.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL.**

- Realizar un análisis de los efectos de la corrosión en los aceros inoxidable, para darle un mejor uso a este material, para garantizar su vida útil y evitar fallas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Conocer los conceptos básicos de los fenómenos de corrosión en sus aspectos teóricos.
- Identificar los principales tipos de corrosión que se pueden presentar en los aceros inoxidable.
- Relacionar la microestructura y las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable con la corrosión que se presenta en estos materiales.

- Identificar los diferentes tratamientos térmicos aplicados a los aceros inoxidables.
- Identificar el comportamiento de los aceros inoxidables con respecto a la soldadura.
- Recomendar en que medio se puede usar cada tipo de acero inoxidable para seleccionarlos de manera adecuada.
- Conocer los aspectos teóricos de los diferentes métodos de inspección para mantenimiento industrial.
- Ilustrar mediante la elaboración de un plan de inspección como se debe evaluar la corrosión en un equipo y que estrategias de mantenimiento se deben realizar para garantizar la vida útil de sus elementos.

## **1. CORROSIÓN**

### **1.1. DEFINICIÓN.**

La corrosión es un ataque destructivo de los metales que puede ser de naturaleza química o electroquímica. También puede definirse como el deterioro de un material como resultado de un ataque de su entorno. La corrosión de metales puede considerarse en cierta medida como el proceso inverso de su obtención. La mayor parte de los metales existen en la naturaleza en estado combinado, por ejemplo como óxidos, sulfuros, silicatos o carbonatos. En estos estados la energía de los metales es mas baja que cuando se encuentran en estado metálico, por lo que los metales tienden espontáneamente a reaccionar químicamente para formar compuestos.

La corrosión no es un fenómeno exclusivo de los metales también se presenta en plásticos, fibra de vidrio, concreto etc. En el caso de los aceros inoxidables, también existe corrosión.

### **1.2. MEDIOS CORROSIVOS.**

Prácticamente todos los ambientes son algo corrosivos, por ejemplo: Aire y humedad; agua pura, salina, destilada; atmósfera rural, urbana e industrial; vapor y otros gases. Como regla general los medios inorgánicos son más corrosivos que los orgánicos. Las altas presiones y temperaturas incrementan la severidad de la corrosión.



### **1.3. DAÑOS POR CORROSIÓN.**

Algunas veces se efectúa una corrosión controlada con el objeto de cortar o maquinar piezas, pulirlas o etc. El anodizado del aluminio es un proceso que consiste en una ligera corrosión controlada.

En la mayoría de los casos, la corrosión no es deseable y causa los siguientes problemas:

- Mala apariencia.
- Alto costo de mantenimiento y de operación.
- Paradas no programadas en la planta.
- Contaminación del producto.
- Malos efectos sobre la seguridad y la confiabilidad.

### **1.4. CLASIFICACION DE LA CORROSIÓN.**

Un método clasifica la corrosión como: corrosión a alta temperatura y a baja temperatura y otro en combinación directa (oxidación) y procesos electroquímicos.

Otro método de clasificación de la Corrosión es:

- a) Húmeda o seca.
- b) Por reacción de química directa o reacción electroquímica.
- c) Según el medio corrosivo · Gas (corrosión gaseosa) · Líquido (corrosión acuosa o no acuosa) · Tierra (corrosión subterránea).

Húmeda o seca. La corrosión húmeda ocurre cuando un líquido está presente, la corrosión seca es causada por vapores o gases y generalmente va a asociada con temperaturas altas.

La presencia de humedad puede cambiar las condiciones, por ejemplo: El gas cloro seco a temperatura ambiente no ataca al acero, pero el gas húmedo es extremadamente corrosiva y ataca a la mayoría de los metales y sus aleaciones. Lo contrario sucede con el titanio, el cloro seco resulta mucho más corrosivo que el cloro húmedo.

Por reacción química directa o reacción electroquímica. La combinación directa sucede cuando existe una reacción entre el metal y otros elementos o compuestos no metálicos. La corrosión por reacción electroquímica sucede en presencia de líquidos conductores de electricidad (electrolito). La mayor parte de la corrosión es causada por líquidos.

### **1.5. TIPOS DE CORROSIÓN.**

En la práctica, los distintos tipos de corrosión se dan juntos y se pueden presentar en sus diferentes formas, en partes diferentes de una instalación. Todos los metales y aleaciones están sujetos a manifestar cualquiera de estos tipos de corrosión.

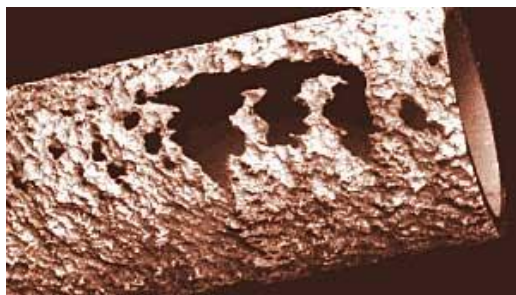
La corrosión puede ser dividida en dos tipos característicos, de acuerdo a su forma de manifestación:

- Corrosión General (Uniforme).
- Corrosión localizada.

### **1.5.1. CORROSIÓN GENERAL (UNIFORME).**

Es muy común y se caracteriza por una reacción sobre la superficie entera del material, reduciendo así su espesor hasta que finalmente llega a la ruptura. Esta consiste en un ataque a una velocidad uniforme en toda la superficie del metal. Este tipo de corrosión se muestra en toda la superficie, generalmente es indefinible el sitio de comienzo del ataque y se forma una película delgada de corrosión en la superficie.

Incluye los tipos de corrosión tan conocidos como la formación de herrumbre en el hierro y el empañado de la plata, el níquel y la oxidación de los metales a alta temperatura.



**FOTO 1. EJEMPLOS DE CORROSIÓN UNIFORME**

### **1.5.2. CORROSIÓN LOCALIZADA.**

Solamente una pequeña área de la superficie del metal es afectada, pero con una velocidad de corrosión relativamente alta; este tipo de corrosión no permite hacer predicciones, su velocidad es impredecible y mucho mayor a la corrosión uniforme y es la mas dañina.

La corrosión localizada se clasifica en:

- Galvánica.
- En grietas (crevice).
- Filiforme.
- Picadura (pitting).
- Íntergranular.
- Disolución selectiva.
- Por erosión.
- Por cavitación.
- Por fricción.
- Bajo tensión (cracking, SCC).
- Hidrogeno.
- Corrosión por fatiga.
- Microbiana.
- Por corriente desviada.

### **1.5.2.1. CORROSIÓN GALVÁNICA.**

También se conoce como corrosión bimetálica. Se presenta cuando la pieza metálica esta eléctricamente unida a otro metal diferente y mas noble, sumergidos en el mismo electrolito.

Siempre que dos o más metales no similares que comparten una común derivación o masa estando sumergido en un medio conductor como es el agua, se produce una reacción química, haciendo que se establezca una corriente eléctrica. El flujo de dicha corriente eléctrica hace que el metal, que es químicamente más activo (más blando), se erosione y si no se lo controla con el tiempo será necesario su reemplazo. Cuando la corrosión avanza las zonas expuestas de metal comienzan a erosionarse.



**FOTO 2. EJEMPLO DE CORROSIÓN GALVÁNICA**

### **1.5.2.2. CORROSIÓN EN GRIETAS (CREVICE).**

La corrosión por grietas es una forma de corrosión electroquímica localizada; este tipo de corrosión esta asociado con pequeños volúmenes de solución corrosiva estancada en huecos, juntas, depósitos superficiales, grietas debajo de tornillos, remaches y pernos, entre láminas, entre válvulas y sus asientos, bajo depósitos porosos y bajo muchas otras situaciones similares donde pueden existir disoluciones estancadas o un producto húmedo.



**FOTO 3. EJEMPLO DE CORROSIÓN EN GRIETAS**

### **1.5.2.3. CORROSIÓN FILIFORME.**

Los metales recubiertos con sustancias orgánicas pueden sufrir un tipo de corrosión que forma numerosos filamentos serpenteados conocidos como corrosión bajo película o filiforme.

Este tipo de corrosión se observa en los aceros, magnesio y aluminio recubiertos con estaño, plata, oro, fosfato, esmalte o laca.

Esta corrosión no destruye mucho el material metálico pero causa daño a la apariencia del producto.



**FOTO 4. EJEMPLO DE CORROSIÓN FILIFORME**

#### **1.5.2.4. CORROSIÓN POR PICADURA (PITTING).**

La corrosión por picaduras se puede definir como el caso extremo del ataque localizado que da lugar al desarrollo de cavidades (agujeros) en la superficie del metal. Estos agujeros pueden ser pequeños o grandes en diámetro, pero en la mayoría de los casos son relativamente pequeños (décimas de milímetro), por esto es muy difícil de detectar y generalmente suele cubrirse con productos de corrosión. Algunas veces las picaduras se encuentran aisladas y en otras se juntan hasta formar casi una superficie rugosa.

Las picaduras son una de las formas más destructivas y más insidiosas de la corrosión. Hacen el equipo fallar debido a la perforación con solamente una pérdida pequeña del peso del porcentaje de la estructura entera.

Las picaduras pueden penetrar varios milímetros durante un período corto, si las condiciones son extremadamente desfavorables. Generalmente la picadura crece en dirección de la gravedad. Para que se presenten las primeras picaduras, se necesita de un tiempo de incubación de meses o años, dependiendo tanto del metal como del ambiente corrosivo.

Una vez comienza la corrosión la velocidad de penetración de la picadura es creciente, además tiende a moverse lateralmente y a corroer el interior del material durante su crecimiento.



**FOTO 5. EJEMPLO DE CORROSIÓN POR PICADURA**



#### **1.5.2.5. CORROSIÓN ÍTERGRANULAR.**

Es un tipo de ataque localizado que ocurre en los espacios que limitan los granos de un metal y que produce pérdida de la resistencia mecánica y de la ductilidad. Mientras los espacios actúan como ánodos, la superficie del grano trabaja como cátodo.

En condiciones ordinarias si un metal se corroe uniformemente, los límites de grano no son de mucha importancia pues solo serán ligeramente más reactivos que la matriz. Pero bajo otras condiciones las regiones de los límites de grano son muy reactivas y se presenta una corrosión ítergranular o íntercristalina, causando pérdidas de resistencia en el material y una desintegración en los límites de grano.

Este tipo de corrosión es causada por:

- Impurezas segregadas en los límites de grano.
- Enriquecimiento de uno de los elementos de aleación en los límites de grano.
- Agotamiento de uno de los elementos de aleación en las regiones próximas a los límites de grano.

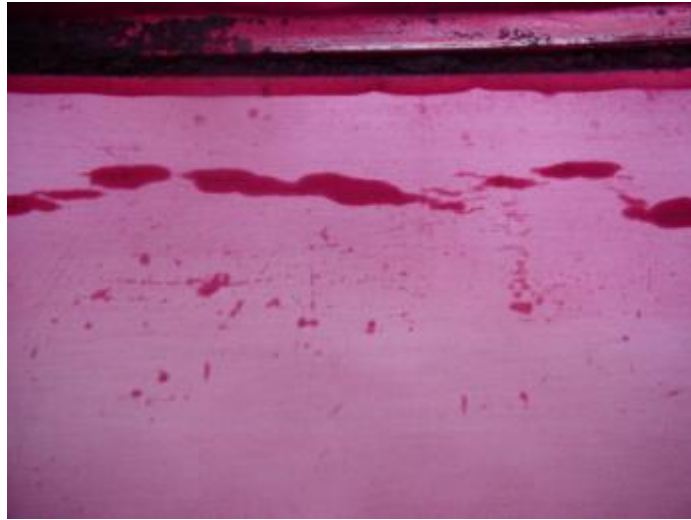


FOTO 6. EJEMPLO DE CORROSIÓN INTERGRANULAR

#### **1.5.2.6. CORROSIÓN DISOLUCIÓN SELECTIVA.**

La disolución selectiva (lixiviación) es la eliminación preferencial de uno de los elementos de aleación sólida. Es un tipo de ataque que ocurre en aleaciones, en donde es atacado de manera selectiva un elemento de la aleación, como por ejemplo en las tuberías de intercambiadores de calor de cobre-zinc, en donde el Zn reacciona químicamente con el fluido (casi siempre por tratamiento deficiente del agua) perdiendo el material su resistencia mecánica.

Los ejemplos más comunes son:

- Decinquificación: Disolución del Zinc.
- Dealuminificación: Disolución del Aluminio.
- Decolbaltificación: Disolución del Cobalto.

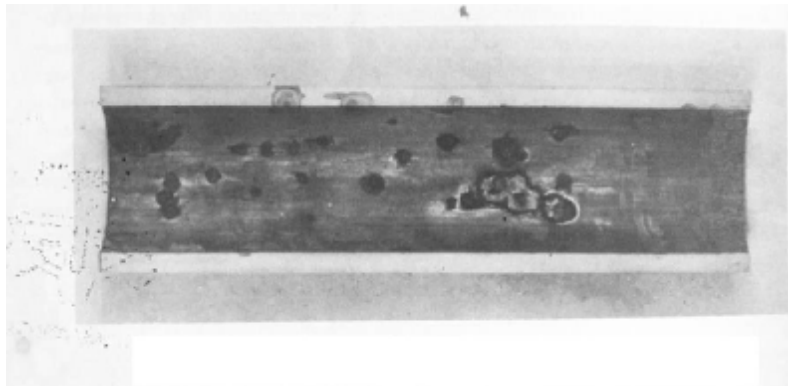


FOTO 7. EJEMPLO DE CORROSIÓN DISOLUCION SELECTIVA

#### **1.5.2.7. CORROSIÓN POR EROSIÓN.**

La corrosión erosiva se define como la aceleración en la velocidad del ataque corrosivo de un metal, debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo respecto a la superficie del material.

Cuando este movimiento es bastante rápido, ocurre un efecto de desgaste mecánico y de abrasión; se disuelve metal en forma de iones y se forman productos de corrosión, los cuales son llevados por el flujo líquido.

Este tipo de corrosión se caracteriza por la aparición de surcos, valles, picaduras, agujeros y otras configuraciones de daños sobre la superficie del metal; generalmente se presentan en la dirección del avance del fluido corrosivo.

#### **1.5.2.8. CORROSIÓN POR CAVITACIÓN.**

Este tipo de corrosión es causado por la formación y colapso de burbujas de aire o de vapor en un líquido que se encuentra cerca de la superficie metálica. La cavitación ocurre en la superficie del metal donde el líquido fluye a alta velocidad y existen cambios de presión tal y como acontecen en propulsores e impulsores. A mayor velocidad del fluido, mayor es la velocidad de corrosión.

La cavitación puede aumentar la velocidad de corrosión y originar desgastes superficiales por separación de las películas de la superficie y arranque de partículas del metal.

Los daños por cavitación tienen un aspecto similar a las picaduras por corrosión, excepto que el espaciamiento de las áreas picadas es más estrecho y la superficie se puede considerar como rugosa. En cambio los daños por cavitación se atribuyen tanto a la corrosión como al desgaste mecánico. La cavitación se da en fluidos turbulentos. La cavitación también se da en superficies donde ocurre la ebullición de un líquido.

#### **1.5.2.9. CORROSIÓN POR FRICCIÓN.**

Este tipo de corrosión es producida por la repetitiva fricción de dos superficies que deterioran el material en un medio corrosivo. La repetitiva fricción elimina la capa protectora produciendo la corrosión.

La corrosión por rozamiento tiene lugar en las interfases de materiales bajo cargas sometidos a vibraciones y deslizamiento, lo cual origina surcos o agujeros rodeados de productos resultantes de la corrosión.

#### **1.5.2.10. CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.**

El agrietamiento de un material por efecto de corrosión bajo tensión, es un fenómeno que se presenta por acción simultánea de esfuerzos de tensión y de un medio corrosivo específico. A veces es llamada cracking o designada por la sigla SCS (Stress Corrosión Cracking).

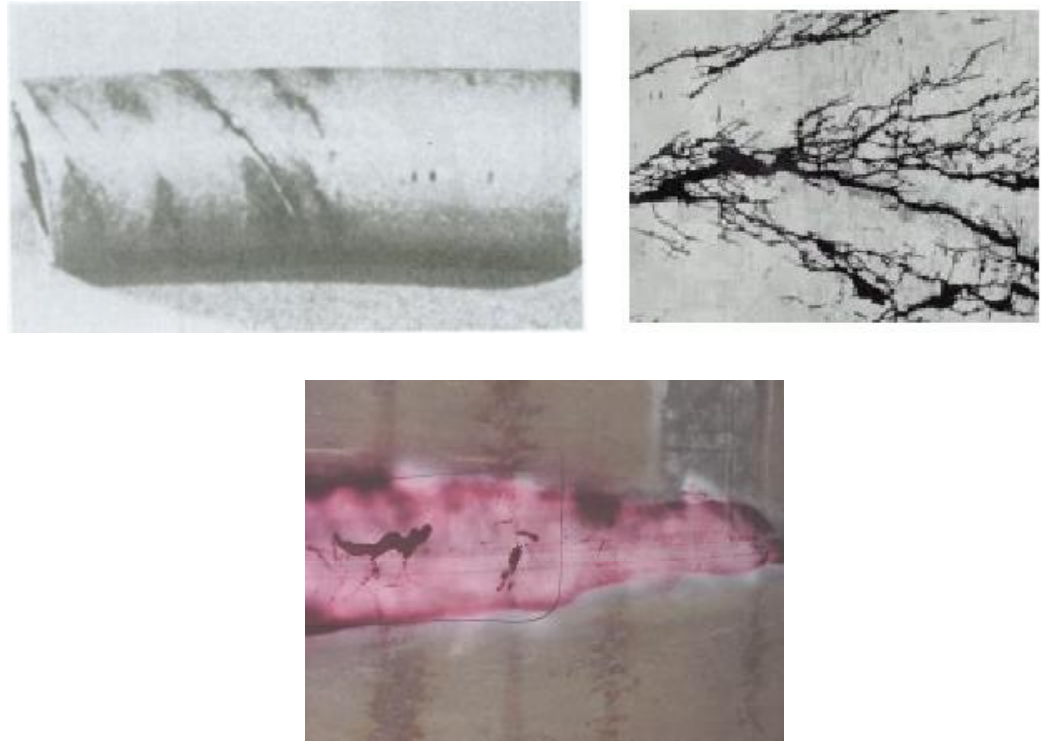
El agrietamiento por corrosión bajo tensión, es un ataque extremadamente localizado, mientras que la superficie general del material no presenta ninguna traza de corrosión.

Se propagan grietas muy finas a través del material y se llega finalmente a una fractura, sin que el esfuerzo aplicado haya alcanzado el valor del esfuerzo permitido sin efectos corrosivos.

Los esfuerzos pueden ser de cualquier origen: aplicados, residuales, térmicos o de soldadura.

El SCC consiste en la aparición de múltiples fisuras microscópicas profundas, que debilitan la pieza, conduciendo una ruptura del material.

Las variables que afectan la fisura son: temperatura, composición de la solución, composición del metal o aleación, tensión y estructura del metal. La fisura se propaga generalmente en la dirección perpendicular a la tensión aplicada.



**FOTO 8. EJEMPLOS DE CORROSIÓN BAJO TENSIÓN**

#### **1.5.2.11. CORROSIÓN POR DAÑOS DE HIDROGENO.**

Este tipo de corrosión se da por la combinación de estrés por tensiones mecánicas e hidrogeno. El hidrogeno se difunde automáticamente en el metal y al desplazar los granos del material produce las fisuras. Este otro tipo de agrietamiento por efectos del hidrógeno, también es llamado "fragilización por hidrógeno". Una diferencia muy importante, es que en el agrietamiento por hidrogeno la corrosión no es parte necesaria ni en la iniciación de la grieta ni en su desarrollo.

Este tipo de corrosión se da por cuatro tipos de daño:

- Ampollas de hidrogeno.
- Fragilización por hidrogeno.
- Descarburización.
- Ataque por hidrogeno.



**FOTO 9. EJEMPLOS DE CORROSIÓN POR DAÑO POR HIDROGENO**

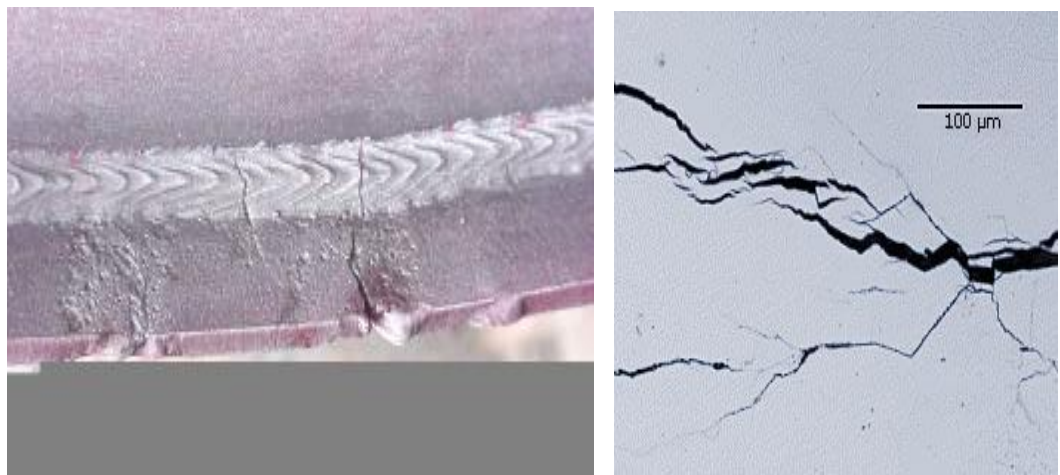
#### **1.5.2.12. CORROSIÓN POR FATIGA.**

La fatiga de un material metálico es su tendencia a la fractura, cuando esta sometido a esfuerzos cíclicos menores que el nivel de su resistencia estática a la fractura.

La corrosión por fatiga se define como la reducción de la resistencia a la fatiga debido a la presencia de un medio corrosivo, o sea, la corrosión por fatiga no se define en términos del aspecto de la falla, sino en términos de las propiedades mecánicas.

Las grietas de fatiga con corrosión son típicamente transgranulares y con frecuencia ramificadas.

Este tipo de corrosión depende de los esfuerzos aplicados y el efecto es más pronunciado a frecuencias bajas del ciclo de esfuerzo, porque hay más tiempo de contacto físico entre el metal y el medio corrosivo.



**FOTO 10. EJEMPLOS DE CORROSIÓN POR FATIGA**

#### **1.5.2.13. CORROSIÓN MICROBIANA.**

En sistemas que están en ambientes con poca o ninguna oxigenación como en ambientes sumergidos o enterrados, se genera el foco ideal para el crecimiento de bacterias anaerobias que se alimentan de algunos de los componentes del material. Las que atacan el acero se alimentan de las partículas de Fe debilitando el material y haciéndolo fallar.

La existencia en los suelos de colonias de bacterias, ocasionan en algunos casos ataques mas severos que los ataques químicos o electroquímicos.



Los tipos más comunes de bacterias son los reductores de sulfato y los productores de ácido. Los ataques ocasionados por estas bacterias son reconocidos por la presencia de manchas negras en la superficie del material, a su vez un olor característico de ácido sulfúrico.



FOTO 11. EJEMPLO DE CORROSIÓN MICROBIANA

#### **1.5.2.14. CORROSIÓN POR CORRIENTES DESVIADAS.**

Se llaman corrientes desviadas aquellas que siguen direcciones distintas al circuito establecido. Cuando estas corrientes entran en un metal sumergido causan corrosión en las zonas por las cuales estas abandonan el metal para volver al medio. Los daños por corrosión causados por las corrientes desviadas están relacionados con la corriente continua.

Estos son más severos que los ocasionados por la corriente alterna ya que esta, de 60 ciclos causa aproximadamente el 1 % de lo que puede provocar la corriente continua equivalente. El deterioro por corrientes vagabundas es inversamente proporcional a la frecuencia de la corriente que la ocasiona.

#### **1.5.2.15. CORROSIÓN POR ALTAS TEMPERATURAS.**

Los daños por corrosión a altas temperaturas también llamados “descascarillado”, consisten en la pérdida de la capa incandescente, lo cual ocurre a una cierta temperatura para cada material y adopta el nombre de “Temperatura de Formación de Cascarilla”.

Es la degradación de un material a elevadas temperaturas donde se forman reacciones químicas entre el material y el medio ambiente. Usualmente empieza entre el 30% y 40% de la temperatura de fusión del metal. Produce formaciones finas de óxidos o sulfuros.

#### **1.6. CONTROL DE LA CORROSIÓN.**

Todos los materiales son susceptibles a presentar corrosión en algún ambiente corrosivo, no existe ningún metal o aleación indicado para todas las aplicaciones. La corrosión puede ser controlada por medio de muchos métodos. Desde el punto de vista industrial, los aspectos económicos de la situación son los que deciden el método a emplear.

Estos métodos preventivos están encaminados a obtener una minimización de los efectos corrosivos para lograr un mayor tiempo de servicio, de los materiales empleados.

Estos métodos no son de aplicación universal por lo que es necesario legalizar un análisis del medio corrosivo que ayude a la selección.

Algunos de los métodos de prevención de la corrosión son los siguientes:

- Buena selección de material.
- Uso de inhibidores.
- Uso de pasivadores.
- Alteración del medio corrosivo.
- Protección anódica.
- Protección catódica.
- Diseño anticorrosivo.
- Recubrimientos metálicos.
- Recubrimientos orgánicos
- Recubrimientos inorgánicos.

#### **1.6.1. BUENA SELECCIÓN DE MATERIAL.**

Es uno de los métodos más comunes para prevenir la corrosión. Consiste en escoger materiales que son resistentes a la corrosión para un particular ambiente corrosivo.

Se pueden escoger distintos tipos de materiales según el ambiente en el que van a trabajar. Se clasifican de la siguiente manera:

- Materiales metálicos.
- Materiales no metálicos.

#### **1.6.1.1. MATERIALES METÁLICOS.**

Existen reglas generales para la selección de metales y aleaciones resistentes a la corrosión:

- Para condiciones reductoras y no oxidantes, tales como ácidos o soluciones acuosas libres de aire, se utilizan mucho el níquel, el cobre y sus aleaciones.
- Para condiciones oxidantes se usan aleaciones que contienen cromo.
- Para condiciones fuertemente oxidantes, se utilizan el titanio y sus aleaciones, puesto que tiene la mayor resistencia a la corrosión.

#### **1.6.1.2. MATERIALES NO METÁLICOS.**

El uso de estos materiales es limitado donde la corrosión es un factor muy importante a considerar.

Los materiales no metálicos más importantes son:

- Hules naturales y artificiales.
- Plásticos.
- Cerámicos.

- Carbono y grafito.
- Madera.

Los polímeros tales como plásticos y cauchos son mas débiles, blandos y en general menos resistentes a ácidos inorgánicos fuertes que las aleaciones y metales. También tienen limitaciones a altas temperaturas, pero son más resistentes a los iones de cloro y al ácido clorhídrico.

Los materiales cerámicos son excelentes para trabajos a altas temperaturas y tienen una alta resistencia a la corrosión, pero son frágiles cuando están sometidos a esfuerzos de tensión, porque presentan una baja resistencia a la tracción.

Los carbonos tienen buena resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica y eléctrica, pero también son frágiles.

La madera no es resistente en ambientes corrosivos agresivos.

En general los materiales no metálicos se utilizan principalmente para el control de la corrosión en forros, juntas y recubrimientos.

### **1.6.2. USO DE INHIBIDORES.**

Se define inhibidor como una sustancia que aplicada en pequeñas cantidades es capaz de reducir la agresividad del medio hacia el metal, este efecto se conoce como inhibición. El uso de inhibidores químicos para disminuir la proporción de procesos de corrosión es bastante variado.

Siempre se ha considerado que los inhibidores son la primera línea de defensa contra la corrosión en el extracto de aceite y las industrias de proceso.

Los inhibidores se clasifican de acuerdo a su conformación química en: inorgánicos, por ejemplo dicromato de sodio, nitrato de sodio, etc.; orgánicos tales como las aminas, aluminohemicelulosa, etc.

Según la aplicación del inhibidor se clasifican en: inhibidores de salmuera, de agua, anticongelantes. Teniendo en cuenta la forma de cómo afecte la polarización del sistema, se clasifican en: anódicos, tales como fosfatos, cromatos, etc. Y catódicos por ejemplo las sales de níquel. La selección del inhibidor y la determinación de la concentración a usar depende de factores como sistema que se tenga, composición del líquido, temperatura, rata de flujo, etc.

### **1.6.3. USO DE PASIVADORES.**

Los pasivadores son sustancias oxidantes inorgánicas capaces de inducir pasivación, cuando están en un nivel de corrosión adecuado, sobre la superficie de ciertos metales que tienen la capacidad de pasivarse. El fenómeno de pasividad es típico de la interacción del agua con metales muy oxidables o aleaciones con suficiente contenido de metales oxidables, por ejemplo el cromo en los aceros inoxidables.

La película pasiva presenta como características fundamentales su fuerte adherencia al metal y aliada al hecho de ser compacta, previene el contacto directo del metal con el medio agresivo. Además si la película pasiva es localmente dañada debido a un arañón, ella puede auto regenerarse en un gran número de medios.

#### **1.6.4. ALTERACIÓN DEL MEDIO CORROSIVO.**

Las condiciones ambientales son muy importantes en la determinación de la gravedad de la corrosión.

Es posible reducir la corrosión realizando las siguientes modificaciones del medio corrosivo:

- Reducción de la temperatura.
- Disminución de la velocidad del flujo del medio corrosivo.
- Eliminación de oxígeno y/o de oxidotes de los fluidos.
- Reducción de las concentraciones iónicas.

#### **1.6.5. PROTECCIÓN ANÓDICA.**

Consiste en la formación de una película protectora pasivadora sobre metales o aleaciones mediante la aplicación externa de corrientes anódicas. Considerando algunas reacciones electroquímicas, la aplicación de corrientes anódicas aumentaría la disolución del material, es decir mayor corrosión y se reduciría el desprendimiento de hidrogeno.

Esto es lo que ocurre con la mayoría de los materiales, con la excepción de aquellos que presentan una transición de estado activo – pasivo como el níquel, hierro, cromo, titanio y sus aleaciones.

Cuando se les aplica una corriente anódica cuidadosamente controlada, se pasivan y la velocidad de corrosión disminuye.

Para efectuar una protección anódica se necesita un equipo electrónico llamado potencióstato, para mantener el material a un potencial constante con respecto a un electrodo de referencia.

#### **1.6.6. PROTECCIÓN CATÓDICA.**

Se define como la reducción de la corrosión, haciendo del metal protegido un cátodo, ya sea por corriente impresa o por medio de ánodos de sacrificio.

Este método consiste en suministrar electrones al metal que se desea proteger, puesto que la adición de electrones tiende a suprimir la disolución de metal y acelerar la producción de hidrógeno.

Los electrones pueden ser suministrados por una fuente de corriente continua externa, o por acoplamiento galvánico con un metal más anódico que el que se desea proteger. Para mantener la estructura bajo protección catódica es necesario determinar la corriente requerida, así como el voltaje para hacer fluir la corriente a lo largo de la corriente.



### **1.6.7. DISEÑO ANTICORROSIVO.**

El diseño de los equipos y estructuras son tan importantes como la selección de los materiales para su construcción. En el diseño hay que considerar los requerimientos de resistencia mecánica propiedades eléctricas y térmicas simultáneamente con los aspectos de corrosión.

El diseño mecánico tiene que efectuarse basándose en el material de construcción, para poder tener en cuenta sus características mecánicas para sus usos en determinados ambientes corrosivos. Como regla general los sistemas deben ser diseñados en condiciones de máxima uniformidad y evitar la heterogeneidad.

### **1.6.8. RECUBRIMIENTOS METÁLICOS.**

El principal objetivo de los recubrimientos metálicos es el de alargar la vida del metal subyacente, por medio de una barrera entre este y el ambiente corrosivo. Los recubrimientos metálicos se aplican a veces de forma que sirvan de ánodo de sacrificio y se corroan en lugar del material que recubren.

Los principales métodos para el recubrimiento de un metal con otro son:

- Electrodeposición.
- Vaporización.
- Inmersión.
- Rociado con llamas.
- Cladding.

### **1.6.9. RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS**

Estos recubrimientos son una barrera relativamente delgada entre el material base y el medio corrosivo. Los recubrimientos orgánicos son: Pinturas, barnices y lacas. Generalmente estos materiales son menos costosos y de más fácil aplicación que los recubrimientos metálicos.

Estos materiales proporcionan barreras finas, tenaces y duraderas que protegen de los medios agresivos o corrosivos. En muchos casos las fallas pueden ser atribuidas a una mala preparación de la superficie del metal, esto ocasiona que la pintura pueda pelarse debido a la falta de enlace.

Si el recubrimiento no tiene una buena adherencia o si es incompatible con la capa exterior, la falla del recubrimiento ocurrirá pronto.

### **1.6.10. RECUBRIMIENTOS INORGÁNICOS.**

Para algunas aplicaciones es deseable cubrir el acero con un recubrimiento que le confiera un acabado liso y duradero.

A estos recubrimientos pertenecen los materiales tales como: Vidrios y cerámicos.

El acero se recubre habitualmente con un recubrimiento de porcelana que consiste en una fina capa de vidrio fundido sobre la superficie del acero de forma que tenga una buena adherencia y que presente un coeficiente de expansión ajustable a la base metálica.

## **2. ACEROS INOXIDABLES.**

### **2.1. HISTORIA DE LOS ACEROS INOXIDABLES.**

A principios de los años veinte, se encontró que los tubos ordinarios de acero al carbono utilizados en los intercambiadores de calor se corroían aceleradamente, en forma particular cerca de los extremos; debido a esto, se consumían grandes cantidades de tubos. Una de las primeras aplicaciones del acero inoxidable fue la sustitución de estas secciones de tubos por una aleación al cromo, conocida actualmente como tipo 429. Sin embargo, los primeros trabajos realizados para la fabricación de los hierros y aceros inoxidables datan del siglo XIX. Ya en aquellos días se sabía que el hierro aleado con ciertos metales, como el cobre y el níquel resistía mejor a la oxidación que el hierro ordinario.

El desarrollo original de lo que son actualmente los aceros inoxidables aconteció en los albores de la primera guerra mundial. En forma independiente y casi simultánea, en Inglaterra y en Alemania se descubrieron los aceros inoxidables tal como los conocemos ahora. Las propiedades y composiciones de los aceros inoxidables se mantuvieron en secreto por los países beligerantes mientras duró la primera guerra mundial. En la actualidad se cuenta con un gran número de tipos y grados de acero inoxidable en diversas presentaciones, y con una gran variedad de acabados, dimensiones, tratamientos, etc.

Dentro de la siderurgia, la historia de los aceros inoxidable es bastante corta, de hecho están en la etapa de introducción. En esta etapa, los nuevos materiales deben vencer la resistencia de los patrones de compra existentes. En teoría, sólo unos pocos, los innovadores, los compran y utilizan. En los próximos años seguramente ocurrirán dos fenómenos, por un lado se descubrirán nuevos tipos de aceros inoxidable y resistentes al calor y, por el otro, se encontrarán muchas nuevas aplicaciones de los mismos.

## **2.2. DEFINICIÓN.**

Los aceros inoxidable son aleaciones ferro-cromo con un mínimo de 12% de cromo. El agregado de otros elementos a la aleación permite formar un amplio conjunto de materiales, conocidos como la familia de los aceros inoxidable. Entre los elementos de aleación, se destacan dos: el cromo, elemento presente en todos los aceros inoxidable por su papel en la resistencia a la corrosión y el níquel porque mejora las propiedades mecánicas. Tal como el nombre lo indica, los aceros inoxidable son más resistentes a la corrosión y a las manchas de lo que son los aceros al carbono y de baja aleación. El extenso rango de propiedades y características secundarias, presentes en los aceros inoxidable hacen de ellos un grupo de aceros muy versátiles. Los aceros inoxidable tienen una resistencia a la corrosión natural que se forma automáticamente, es decir no se adiciona.

Tienen una gran resistencia mecánica, de al menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperaturas elevadas y a temperaturas criogénicas. Son fáciles de transformar en gran variedad de productos y tiene una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado a espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc. Existen aproximadamente más de 130 composiciones químicas diferentes de aceros inoxidable, los cuales pueden estar aleados con Cu, Al, Si, Ni, Mo, Nb y Ti que también aumentan su resistencia a la corrosión. Las principales ventajas del acero inoxidable son: Alta resistencia a la corrosión, resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas, alta resistencia mecánica, apariencia y propiedades higiénicas, resistencia a altas y bajas temperaturas, buenas propiedades de mecanizado, corte, doblado y plegado, bajo costo de mantenimiento, diferentes terminaciones de moderno y agradable aspecto es 100% reciclable.

## **2.3. INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION.**

### **2.3.1. CROMO.**

El cromo es el elemento esencial en la formación de la película pasiva. Otros elementos pueden influenciar la eficacia del cromo para la formación o para mantener la película, pero ningún otro elemento puede, por sí mismo, crear las características del acero inoxidable.

Se añade generalmente para aumentar la resistencia a la corrosión y la oxidación, incrementa la templabilidad y mejora la resistencia del acero a altas temperaturas, también mejora la resistencia al desgaste en aceros de alto contenido de carbono, impide las deformaciones en el temple y evita la formación de grietas.

El cromo también refina la estructura granular de modo que los efectos combinados dan lugar al aumento tanto a la tenacidad como a la dureza. La adición de cromo amplía el intervalo de temperaturas y desplaza hacia la izquierda el punto eutéctico.

### **2.3.2. NÍQUEL.**

En suficientes cantidades, estabilizará la estructura austenítica; esto realza de gran manera las características mecánicas de fabricación. En combinación con el cromo produce aceros con mayor templabilidad, mayor resistencia al impacto, y mayor resistencia a la fatiga. Su inclusión permite rebajar la velocidad de enfriamiento en los tratamientos térmicos.

Una de las ventajas más grandes, es que ayuda a evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir una gran tenacidad. Esto aumenta la resistencia sin disminuir la ductilidad. El níquel además hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente mas bajas.

El aumento del contenido del níquel cerca de 8 a del 10% disminuye la resistencia al SCC (stress corrosion cracking o corrosión bajo tensión), pero aumentos posteriores comienza a restaurar resistencia del SCC.

### **2.3.3. COBRE.**

Es perjudicial para los trabajos en caliente del acero pero es el elemento mas importante y beneficioso para la resistencia a la corrosión atmosférica cuando se presenta en cantidades superiores al 0,20 %.

### **2.3.4. ALUMINIO.**

Proporciona una desoxidación eficaz, afina el tamaño de grano, elemento de aleación en aceros de nitruración. Se agrega en porcentajes desde 0.001 a 0.008%.

### **2.3.5. SILICIO.**

Es uno de los principales desoxidantes empleados en la fabricación del acero y su presencia esta relacionada con el tipo de acero.

Elemento de aleación en chapas Magnéticas ya que en presencia de campos magnéticos variables dan lugar solo a perdidas magnéticas muy pequeñas, debido a que el silicio aumenta mucho su resistividad. También mejora ligeramente la templabilidad y la resistencia. Se emplea como desoxidante para evitar que aparezcan poros y otros defectos internos. Se agregan porcentajes variables de 0.20 a 0.34 %.

### **2.3.6. MOLIBDENO.**

Su inclusión afecta a la templabilidad del acero necesitando más altas temperaturas de temple y las velocidades de transformación son más lentas. Aumenta su resistencia en caliente y al desgaste. Mejora notablemente la resistencia a la tracción. El molibdeno agranda el intervalo crítico de temperatura y abate sustancialmente el punto de transformación.

Debido a este abatimiento el molibdeno es muy eficaz para impartir propiedades deseables de templabilidad en aceite o en aire.

### **2.3.7. NIOBIO.**

Mejora la resistencia a alta temperatura

### **2.3.8. TITANIO.**

Afina el tamaño de grano, mejora la capacidad de Conformación. Se suele añadir en pequeñas cantidades para desoxidar y afinar el grano.

En los aceros inoxidables actúa como estabilizador de los carburos y evita la corrosión intercrystalina.

### **2.3.9. MANGANESO.**

Todos los aceros contienen este elemento contribuyendo a su dureza y resistencia pero en un grado inferior al carbono .Es beneficioso para la calidad superficial del Acero y especialmente con contenidos altos de Azufre.



El manganeso en cantidades moderadas y en la asociación con las adiciones del níquel realizará muchas de las funciones atribuidas para niquelar.

La morfología y la composición de estos sulfuros pueden tener efectos substanciales en la resistencia a la corrosión.

#### **2.4. NOMENCLATURA PARA LOS ACEROS INOXIDABLES.**

Existen tantas formas diferentes para designar un mismo acero. Así por ejemplo, hay múltiples formas para designar el acero inoxidable 304. Son equivalentes: 304 (AISI), S30400 (UNS), X5CrNi18-10(DIN), 1.4301 (W.Nr.), Z7CN18-09 (AFNOR), 2333 (SS), SUS304 (JIS), 304S31 (BS).

Restringiéndonos sólo al sistema americano, son relevantes la influencia de instituciones como ASTM (American Society for Testing and Materials), AISI (American Iron and Steel Institute), ASME (American Society of Mechanical Engineers), SAE (Society of Automotive Engineers), ANSI (American National Standards Institute), ACI (Alloy Casting Institute), AWS (American Welding Society) en la designación de los aceros y sus normas de fabricación para diferentes productos. Entre los usuarios existe a veces mal uso de los sistemas de nomenclatura lo que lleva a confusión al momento de colocar una orden de compra. Una confusión muy frecuente es no distinguir entre “Norma de fabricación” y “Grado” de un acero.

Por ejemplo se habla de acero A106, para referirse a un acero al carbono, en circunstancia que ésta es una norma ASTM para la fabricación de cañerías sin costura de acero al carbono, el cual puede ser de grado A, grado B o grado C (los que difieren en el contenido de carbono y manganeso y en sus parámetros mecánicos) dentro de la misma norma. Otro error es designar como acero, a aleaciones que no lo son.

Actualmente se considera acero a una aleación cuyo contenido porcentual de hierro, en peso, es superior al de cualquier otro componente de la aleación y con un contenido de carbono que no supere el 2%. La doble designación de una norma como A213/A213M indica que son aplicables medidas tanto imperiales como métricas (la M se debe especificar en la orden). En las normas ASTM, para referirse a los distintos aceros, se puede hablar de "Grado", "Clase" o "Tipo". Por ejemplo A106 Grado A, A48 Clase 20A, A276 Tipo 304.

Los códigos numéricos o alfanuméricos usados para referirse a un acero, a veces tienen algo de significado. En los grados designados por letras del alfabeto A, B, C,... el contenido de carbono y su resistencia mecánica aumentan en el mismo orden. En las clases, el código numérico indica su tensión de ruptura en ksi.

La designación de un mismo acero también cambia según se trate de un producto laminado, forjado (se usa nomenclatura AISI, Ejemplo TP304 para tubos y cañerías, F304 para piezas forjadas, WP304 y CR304 para fittings o un producto fundido (se usa nomenclatura ACI, Ejemplo CF8 para el cuerpo fundido de una válvula, no se dice “304 fundido”).

Esta gran diversidad y falta de sistematización se trata de resolver, mediante un sistema de numeración unificado UNS (Unified Numbering System) acordado entre ASTM y SAE, que poco a poco se ha ido divulgando. Sin embargo, el peso de la costumbre es algo difícil de eliminar.

La ASME en su Código para Calderas y Recipientes Presurizados, Sección II, partes A y B, contiene los estándares para los materiales utilizados. Los ferrosos en la parte A y los no-ferrosos en la parte B.

Estos se basan en los estándares ASTM y en muchos casos son idénticos. Por esa razón se usa la misma designación para la norma pero antecediendo una S (por ejemplo ASTM A516 se llama ASME SA516).

#### **2.4.1. NOMENCLATURA AISI/SAE.**

Para los aceros inoxidable se usa el sistema AISI que utiliza un código de tres dígitos a veces seguido de una o más letras.

El primer dígito da una pista de la clase de acero. Serie 2xx y 3xx corresponden a aceros austeníticos. La serie 4xx incluye los aceros ferríticos y martensíticos.

Aparte de esto no hay más lógica en el sistema. El segundo y tercer dígito no están relacionados a la composición ni se sigue una secuencia (ejemplo 430 y 446 son ferríticos mientras que 431 y 440 son martensíticos).

Las letras de sufijo pueden indicar la presencia de un elemento adicional o indicar alguna característica especial (L indica bajo carbono, N indica nitrógeno, Se indica selenio, H indica mayor cantidad de carbono para alta temperatura).

Las letras del sufijo llevan asociadas un par de dígitos terminales en el correspondiente número UNS. Hay muchos aceros inoxidable que no están incluidos en el sistema AISI como los endurecibles por precipitación (clase PH) y la mayoría de los aceros dúplex.

Un grupo importante de estos aceros se designa con nombres propios registrados (ejemplo 17-4PH, SAF2507, Zerón100, Ferralium 255, etc.) o simplemente por su UNS.

**TABLA 1. NOMENCLATURA SISTEMA AISI/SAE**

SUFIJO AISI	SUFIJO UNS	DESCRIPCIÓN
XxxL	Xxx01	bajo carbono < 0.03% evita SCC
XxxS	Xxx08	bajo carbono < 0.08%
XxxN	Xxx51	nitrógeno agregado mayor resistencia
XxxLN	Xxx53	bajo C < 0.03% + N agregado
XxxF	Xxx20	mayor S y P mejor mecanizado
XxxSe	Xxx23	Selenio mejor mecanizado
XxxB	Xxx15	Si agregado evita descamado
XxxH	Xxx09	Mayor contenido de carbono
XxxCu	Xxx30	Cobre agregado

#### 2.4.2. SISTEMA UNS.

El sistema de UNS fue introducido en los años 70 para proporcionar un listado sistemático y enciclopédico de las aleaciones del metal, Incluyendo los aceros inoxidable. Aunque no es perfecto, el sistema de numeración de UNS ha sido acertado en mantener un grado de orden durante un período en que eran introducidos muchos nuevos grados. Es un sistema de código alfanumérico que comienza con una letra y es seguida por cinco dígitos, aplicable a todo tipo de aleaciones. El número UNS es único para cada aleación e indica una composición. No es una norma ni una especificación. Para los aceros inoxidable se comienza con la letra "S" y los tres primeros dígitos corresponden al código AISI. Los dos últimos dígitos indican las variaciones sobre el grado básico (ejemplo 304L vs. 304) tal como se indicó más arriba. Las aleaciones de níquel comienzan con la letra "N" (ejemplo Hastelloy C-276, UNS = N10276).

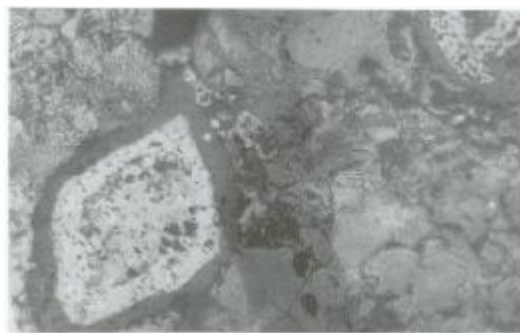
TABLA 2. NOMENCLATURA SISTEMA UNS.

NÚMERO UNS	CLASE
Dxxxxx	Aceros de propiedades mecánicas específicas
Fxxxxx	Hierros fundidos
Gxxxxx	Aceros al carbono y aceros aleados AISI y SAE excepto aceros para herramientas
Hxxxxx	Aceros endurecibles AISI (tipo H)
Jxxxxx	Aceros fundidos
Kxxxxx	Aceros y aleaciones ferrosas diversas
Sxxxxx	Aceros inoxidable resistentes a corrosión y temperatura
Txxxxx	Aceros para herramientas
Wxxxxx	Metales de aporte de soldadura, electrodos cubiertos y tubulares clasificados por composición del depósito

## **2.5. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES.**

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es debida a una delgada película de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero; como consecuencia de agregar cromo como elemento de aleación. Esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas y por lo tanto pasiva. Esta es la característica fundamental de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable. Su propiedad fundamental es la resistencia a la corrosión húmeda y seca, además de una amplia gama de propiedades secundarias. Si se elimina la película de óxido de cromo que recubre los aceros inoxidable, se vuelve a formar inmediatamente otra al combinarse el cromo con el oxígeno de la atmósfera ambiente.

Cuando dicha capa está limpia y adecuadamente formada, es bastante inerte bajo la mayoría de las condiciones ambientales o de proceso; se dice entonces que el acero inoxidable está en estado "pasivo".



**FOTO 12. Esta capa de óxido convierte la aleación de activa en pasiva. Es una capa adherente, impermeable, transparente y autoregenerable. La figura muestra una capa de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en la partícula de polvo de cromo situado en la zona inferior izquierda de la micrografía.**

A pesar de ser sumamente delgada ésta película invisible fuertemente adherida al metal, lo protege contra los distintos tipos de corrosión, renovándose inmediatamente cuando es dañada por abrasión, corte, maquinado, etc. Aunque la mínima cantidad de cromo necesaria para conferir esta resistencia superior a la corrosión depende de los agentes de corrosión, el Instituto Estadounidense de Hierro y Acero ha elegido el 10 por ciento de cromo como la línea divisoria entre aceros aleados y aceros inoxidables, mientras que otros establecen ese límite entre el 10,5% y el 12%.

Todos los aceros inoxidables contienen el cromo suficiente para darles sus características de inoxidables.

Muchas aleaciones inoxidables contienen además níquel para reforzar aun más su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son añadidas al acero en estado de fusión para hacerlo "inoxidable en toda su masa". Por este motivo, los aceros inoxidables no necesitan ser ni chapeados, ni pintados, ni de ningún otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión. En el acero inoxidable no hay nada que se pueda pelar, ni desgastar, ni saltar y desprenderse.

El empleo de acero inoxidable estará bajo la dependencia de las características oxidantes del ambiente. La resistencia a la corrosión en diversos ambientes agresivos, dependerá de la resistencia de la capa óxido pasiva, en ese ambiente particular.

Si imperan condiciones fuertemente oxidantes, los aceros inoxidable resultan superiores a los metales y aleaciones más nobles. Sin embargo, en la misma familia de los aceros inoxidable la resistencia a la corrosión varía considerablemente de un tipo al otro.

A medida que aumenta el riesgo de corrosión es necesario aumentar la concentración de cromo, aunque debe tenerse en cuenta que el aumento de resistencia a la corrosión no es proporcional. Sin embargo con alrededor de 18% de Cr el acero está en condiciones de soportar las mas rigurosas condiciones atmosféricas.

Los aceros inoxidable no son atacados por el ácido nítrico u otros ácidos oxidantes, sino mas bien que estos facilitan la formación de la película protectora.

En cambio los ácidos reductores como el ácido clorhídrico o fluorhídrico atacan fuertemente a los aceros inoxidable.

El efecto de los ácidos y las sales varía según las condiciones de servicio, concentración del agente corrosivo y del tipo de acero. Para obtener la máxima resistencia a la corrosión se recomienda mantenerlo limpios y pulidos para conservar la superficie libre de sustancias extrañas que pudieran albergarse en las irregularidades o poros del material.



## **2.6. CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES.**

Los aceros inoxidable no son indestructibles, sin embargo con una selección cuidadosa, sometiénolos a procesos de transformación adecuados y realizando una limpieza periódica, algún integrante de la familia de los aceros inoxidable resistirá las condiciones corrosivas y de servicio más severas; a través de los años se han descubierto un número de diferentes tipos de aleaciones de acero inoxidable y se han categorizado en cinco (5) grupos, esta clasificación es según la American Iron and Steel Institute.

Los cinco (5) grupos importantes de aceros inoxidable, se definen según la estructura cristalográfica. Cada grupo es distinto con respecto a sus propiedades mecánicas típicas.

Estos cinco (5) grupos son: Aceros Inoxidable Austeníticos, Martensíticos, Ferríticos, Dúplex y Endurecidos por Precipitación.

### **2.6.1. ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.**

#### **2.6.1.1. GENERALIDADES.**

Estas aleaciones se llaman austeníticas porque su estructura recuerda la austenita (FCC, hierro tipo  $\gamma$ ) a todas las temperaturas normales de tratamiento térmico. Los aceros inoxidable austeníticos contienen níquel y cromo. La adición de cantidades substanciales de níquel a las aleaciones de alto contenido de cromo estabiliza la austenita a temperatura ambiente. Este grupo de aceros contiene el cromo de 16 al 26% y el níquel de 6 al 22%.

El bajo contenido de carbono se mantiene (0.08%) para reducir al mínimo la precipitación del carburo. El inoxidable austenítico más popular es el Tipo 304, que contiene básicamente 18% de cromo y 8% de níquel, con un contenido de carbono limitado a un máximo de 0,08%. Tiene gran aplicación en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, uso en arquitectura, alimenticia, y de transporte.

Es también utilizado en cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores y en un sin número de aplicaciones. Sin embargo, muchas otras composiciones se han desarrollado para resolver condiciones especiales y para las aplicaciones especiales.

Son los más comúnmente usados (304, 316). La serie 300 corresponde a aceros de hierro-cromo-níquel que por su alto contenido de cromo y níquel son de los más resistentes a la corrosión en general y poseen buenas propiedades mecánicas.

Las propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene - limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas.

### **Grados Corrientes.**

Contienen un máximo de 0.08% de carbono sin existir un valor mínimo. Basta con que el material satisfaga las propiedades mecánicas exigidas.

El contenido de carbono es responsable de la resistencia mecánica en gran medida. No aptos para soldar.

### **Grados L.**

Contienen un máximo de 0.03% de carbono (lo que disminuye la resistencia mecánica) para evitar la precipitación de carburos de cromo por calentamiento durante la soldadura.

La pérdida de cromo hace perder la propiedad inoxidable en esa zona conduciendo a la corrosión intergranular. Son para soldar.

El carbono, mejora su resistencia mecánica a alta temperatura. Se utilizan para temperaturas altas.

### **Grados H.**

Contienen mínimo 0.04% y máximo 0.10% de carbono, para mejorar su resistencia mecánica a alta temperatura. Son para temperaturas altas. Son usados para soldar.

### **Doble Grado.**

316/316L indica bajo contenido de carbono (316L) pero resistencia mecánica del grado corriente (316).

### **Grados Más Comunes.**

**304** Uso generalizado con buena resistencia a la corrosión para la mayoría de las aplicaciones.

**310** Equipos y partes para hornos. Resiste temperaturas de 900 a 1100° C.

**316** Utilizado donde se requiere mayor resistencia a la corrosión, ejemplo: equipos marinos.

**321** Contiene titanio, es muy apto para soldaduras críticas y resiste temperatura de hasta 800 °C.

**TABLA 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.**

<b>Tipo AISI</b>	<b>C max.</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Mo</b>	<b>Mn max.</b>	<b>Si Max</b>
201	0.15	16-18	3.5-5.5	0.06	0.03	-	7.5	1
202	0.15	17-19	4-6	0.06	0.03		10	1
205	0.25	16.5-18	1-1.75	0.06	0.03		15.5	0.5
301	0.15	16-18	6-8	0.045	0.03		2	1
302	0.15	17-19	8-10	0.045	0.03		2	1
302B	0.15	17-19	8-10	0.045	0.03		2	3
303	0.15	17-19	8-10	0.2	0.15	0.6	2	1
303 Se)	0.15	17-19	8-10	0.2	0.06		2	1
304	0.08	18-20	8-12	0.045	0.03		2	1
304L	0.03	18-20	8-12	0.045	0.03		2	1
304N	0.08	18-20	8-10.5	0.045	0.03		2	1
305	0.12	17-19	10-13	0.045	0.03		2	1
308	0.08	19-21	10-12	0.045	0.03		2	1
309	0.2	22-24	12-15	0.045	0.03		2	1
309S	0.08	22-24	12-15	0.045	0.03		2	1
310	0.25	24-26	19-22	0.045	0.03		2	1.5
310S	0.08	24-26	19-22	0.045	0.03		2	1.5
314	0.25	23-26	19-22	0.045	0.03		2	3
316	0.08	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3	2	1
316F	0.08	16-18	10-14	0.2	0.1	1.75-2.5	2	1
316L	0.03	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3	2	1
316N	0.08	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3	2	1
317	0.08	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4	2	1
317L	0.03	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4	2	1
321	0.08	17-19	9-12	0.045	0.03		2	1
330	0.08	17-20	34-37	0.04	0.03		2	1.5
347	0.08	17-19	9-13	0.045	0.03		2	1
348	0.08	17-19	9-13	0.045	0.03		2	1
348H	0.04-0.1	17-19	9-13	0.045	0.03		2	1
384	0.08	15-17	17-19	0.045	0.03		2	1

### **2.6.1.2. PROPIEDADES MECANICAS.**

Los aceros inoxidable austeníticos no pueden ser endurecido excepto por trabajo en frío. El tratamiento térmico no causará endurecimiento. Los aceros inoxidable austeníticos no son magnéticos y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Son muy dúctiles y presentan excelente soldabilidad.

En la condición recocida la fuerza extensible es aproximadamente 85.000 PSI. Los aceros inoxidable austeníticos son resistentes y dúctiles.

Todos los aceros al carbono y los aceros de baja aleación llegan a ser cada vez más frágiles mientras que la temperatura se reduce y se debe utilizar con precaución si se espera que la temperatura de funcionamiento sea mucho menos de el 18 °C (0 °F).

Los aceros inoxidable austeníticos son casi exentos de esta fragilidad a baja temperatura, y los aceros por lo tanto inoxidable se utilizan extensamente en el equipo que funciona a bajas temperaturas. Cuanto mayor es el porcentaje de presencia de níquel, más baja es la temperatura de funcionamiento permisible. Todos los métodos estándares de fabricación se pueden utilizar para trabajar estos aceros; sin embargo, los grados de austenita son difíciles de trabajar a máquina puesto que se endurecen e irritan.

Las máquinas rígidas, los cortes pesados, y el alto calor de la soldadura pueden causar la precipitación del carburo del cromo, que agota la aleación con un poco de cromo en el área soldada y baja su resistencia a la corrosión en servicio líquido. Las altas temperaturas no afectan las características.

Éste no es grave para el servicio suave, pero para el servicio corrosivo severo los carburos se deben poner nuevamente dentro de la solución para el tratamiento térmico, que no es siempre posible con las autógenas del campo. Los aceros inoxidable austeníticos tienen alta resistencia a muchos ácidos, incluso el ácido nítrico frío o caliente. Poseen excelente tenacidad a temperaturas tan bajas como la del helio líquido (-269° C ó - 452 ° F) y son útiles para piezas sometidas a esfuerzos severos a temperaturas elevadas.

#### **2.6.1.3. RESISTENCIA A LA CORROSION.**

Los aceros inoxidable austeníticos trabajan mejor bajo condiciones oxidantes, puesto que su resistencia es dependiente de una película de óxido que se forman en la superficie de la aleación, reduciendo así las condiciones y los iones del cloruro que destruyen esta película y que causan el ataque rápido. Los iones del cloruro combinados con altas tensiones extensibles, causan a corrosión bajo tensión.

Estas aleaciones tienen una resistencia excelente al ácido nítrico en prácticamente todas las concentraciones y temperaturas.

Para manejar el ácido sulfúrico, sin los inhibidores, el acero inoxidable tipo 316 ha limitado su aplicación. Debajo del 5% y sobre el 85% puede ser utilizado solamente en las temperaturas debajo del punto de ebullición

Los aceros inoxidable austeníticos se pueden sensibilizar a la corrosión intergranular por la exposición termal de más largo plazo.

Estas exposiciones termales conducen a la precipitación de los carburos del cromo en límites de grano y al agotamiento del cromo adyacente a estos carburos.

La sensibilización se puede retrasar o prevenir grandemente por el uso de bajo grado de carbono ( $< 0.03\% \text{ C}$ ) o grados estabilizados, tales como tipos 321 y 347 de AISI, que incluyen las adiciones de los elementos carburo que se estabilizan (titanio y niobio, respectivamente).

Los grados de austenita comunes, los tipos 304 y 316 de AISI, son especialmente susceptibles al cloruro SCC.

Todos los aceros inoxidable austeníticos exhiben un cierto grado de susceptibilidad, pero varios de los altos grados de molibdeno y níquel son satisfactorios con respecto a ataque de la corrosión bajo tensión en la mayoría de los usos de la ingeniería. Los aceros inoxidable austeníticos son más resistentes a la corrosión que los aceros inoxidable ferríticos y martensíticos, porque los carburos pueden retenerse en solución sólida por enfriamiento rápido desde altas temperaturas.

## **2.6.2. ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.**

### **2.6.2.1. GENERALIDADES.**

Estas aleaciones se llaman martensíticas porque son capaces de desarrollar una estructura martensítica después de un tratamiento térmico de austenización y temple.



Con niveles más bajos del cromo y relativamente alto niveles de carbono, es posible obtener austenita a una temperatura elevada y entonces, con enfriamiento acelerado, se transforma esta austenita a martensita, que tiene una estructura tetragonal de cuerpo centrado.

En años recientes, las adiciones del nitrógeno, del níquel y del molibdeno en niveles algo más bajos del carbón han producido aceros inoxidable martensíticos de mejorada dureza y resistencia a la corrosión. La martensita es una fase rica en carbono, frágil y extraordinariamente dura.

Los aceros inoxidable martensíticos tienen la característica común de ser magnéticos y endurecibles por tratamiento térmico, presentando cuando templados una microestructura acicular (en forma de agujas).

Es importante observar que estos aceros son normalmente producidos por la industria siderúrgica en estado recocido, con ductilidad razonablemente buena. Solamente después de templados serán muy duros y poco dúctiles. Pero es precisamente en esta condición (templados), que serán resistentes a la corrosión.

Están dentro de la serie 400 junto con los aceros ferríticos. Son la primera rama de los aceros inoxidable, llamados simplemente al Cromo y fueron los primeros desarrollados industrialmente (aplicados en cuchillería).

Tienen un contenido de Carbono relativamente alto de 0.2 a 1.2% y de Cromo de 12 a 18%. Las propiedades básicas son: Elevada dureza (se puede incrementar por tratamiento térmico) y gran facilidad de maquinado, resistencia a la corrosión moderada.

**Tipo 410.**

Es el grado base de la serie con el nivel más bajo (11.5-13.5% cromo) de metal de aleación de todos los grados básicos (304, 410, 430). Contiene un nivel de carbono de 0.15% como máximo. Es de bajo costo y uso general. Se utiliza bajo condiciones corrosivas leves (aire, agua, algunos reactivos químicos poco agresivos, alimentos). Una aplicación típica es en "fijaciones" donde se combina la necesidad de resistencia a la corrosión con gran resistencia mecánica.

**Tipo 410s.**

Contiene menos carbono (0.04% de carbono) que el 410 (0.15% de carbono) lo que mejora la soldabilidad pero es menos endurecible.

**Grados Más Comunes.**

**410** grado de uso generalizado en ambientes moderadamente corrosivos.

**420** Acero templable utilizado en herramientas de corte, instrumentos quirúrgicos, etc.

**TABLA 4. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS.**

Tipo AISI	C	Cr	Ni	P	S	Mo	Mn max.	Si max.
403	0.15 max.	11.5-13		0.04	0.03		1	0.5
410	0.15 max.	11.5-13		0.04	0.03		1	1
414	0.15 max.	11.5-13	1.25-2.5	0.04	0.03		1	1
416	0.15 max.	12-14		0.06	0.15	0.6	1.25	1
416 (Se)	0.15 max.	12-14		0.06	0.06		1.25	1
420	0.15 min..	12-14		0.04	0.03		1	1
431	0.2 max.	15-17	1.25-2.5	0.04	0.03		1	1
440A	0.6-0.75	16-18		0.04	0.03	0.75	1	1
440B	0.75-0.95	16-18		0.04	0.03	0.75	1	1
440C	0.95-1.2	16-18		0.04	0.03	0.75	1	1
501	0.1 min	4-6		0.04	0.03	0.4-0.65	1	1
502	1.1max	4-6		0.04	0.03	0.4-0.65	1	1
503	0.15	6-8		0.04	0.04	0.45-0.65	1	1
504	0.15	8-10		0.04	0.04	0.9-1.1	1	1

#### **2.6.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS.**

Los aceros inoxidables Martensíticos se pueden endurecer por el tratamiento de calor, que puede aumentar la fuerza extensible a partir del 80.000 a 200.000 PSI. Un alto endurecimiento se puede alcanzar por medio del tratamiento térmico.

La gama de temperaturas de endurecimiento depende de la composición, pero en general cuanto más alta es la temperatura de temple, más duro es el artículo. El temple de aceite es preferible, pero con formas finas e intrincadas, el endurecer refrescando con aire debe ser utilizado.

La temperatura en 425 °C no reduce la dureza de la pieza, y en esta condición estas aleaciones han demostrado una resistencia excepcional a los ácidos de la fruta y del vehículo, a la lejía, al amoníaco, y a otros agentes corrosivos.

La alta dureza y la consecuente resistencia al desgaste, determinan las aplicaciones de este material, utilizado en cuchillería, discos de freno, equipos quirúrgicos, odontológicos y turbinas.

### **2.6.2.3. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.**

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable martensíticos es inferior a la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable austeníticos.

Estas aleaciones se utilizan generalmente en servicios suavemente corrosivos tales como agua atmosférica, dulce, y exposiciones orgánicas.

Debido a la capacidad al aumentar el calor, estas aleaciones con un alto grado de dureza y debido a su resistencia a la oxidación, se utilizan extensivamente para los instrumentos de las hojas de afeitar de la cuchillería y dentales, resortes para las operaciones de alta temperatura, las válvulas y los asientos de bola, y las aplicaciones similares.

La mayoría de los aceros inoxidable martensíticos contienen sólo el mínimo requerido de Cr (12%) para su pasividad en ambientes húmedos, ya que si se añadiera más Cr se promovería la formación de ferrita a expensas de la austenita, la cual es necesaria para la formación de la martensita. Sólo cantidades limitadas de otros aleantes, como Ni, pueden ser adicionadas esto debido a que la transformación de austenita a martensita se ve inhibida.

### **2.6.3. ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS.**

#### **2.6.3.1. GENERALIDADES.**

Se llaman ferríticos porque su estructura permanece en su mayor parte ferrítica (BCC, hierro tipo  $\alpha$ ) en condiciones normales de tratamientos térmicos. Los aceros inoxidable ferríticos contienen cromo de 15 al 30% con un contenido bajo del carbón (0.1%).

El cromo es un estabilizador de la ferrita; por lo tanto, la estabilidad de la estructura ferrítica aumenta con el contenido del cromo. La ferrita tiene una estructura cristalina cúbica de cuerpo centrado.

La ferrita demuestra una solubilidad extremadamente baja para los elementos intersticiales tales como el carbón y el nitrógeno.

Los grados ferríticos exhiben una transición de dúctil a un frágil comportamiento sobre una gama de temperaturas algo estrecha. Los aceros inoxidable ferríticos también son magnéticos.

A pesar de tener una menor cantidad de carbono que los martensíticos, se tornan parcialmente austeníticos a altas temperaturas y consecuentemente precipitan martensita durante el enfriamiento. Puede decirse que son parcialmente endurecibles por tratamiento térmico.

Están dentro de la serie 400 junto con los aceros martensíticos. También se consideran simplemente al Cromo, su contenido varía de 12 a 8%, pero el contenido de Carbono es bajo <0.2%.

Los tipos más comunes son el AISI 430, 409 y 434.

Las propiedades básicas son: Buena resistencia a la corrosión. La dureza no es muy alta y no pueden incrementarla por tratamiento térmico. En el 430 el contenido 16-18% de cromo es mayor y el contenido 0.12% de carbono es menor que en el martensítico 410.

### Grados Más Comunes.

**409** Es un acero resistente a las altas temperaturas, con buena formabilidad y soldabilidad. Principalmente utilizado para sistemas de escape de automotores y donde se requiera una resistencia mayor que la que ofrece la chapa galvanizada.

**430** Utensilios de cocina. Artículos ornamentales. Revestimientos de heladeras, secarropas, lavavajillas. etc.

**TABLA 5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS.**

Tipo AISI	C max.	Cr	Mn max.	Si max.	Mo	P	S
405	0.08	11.5-14.5	1	1		0.04	0.03
403	0.12	14-18	1	1			
409	0.08	10.5-11.75	1	1		0.045	0.045
429	0.12	14-16	1	1		0.04	0.03
430	0.12	16-18	1	1		0.04	0.03
430F	0.12	16-18	1.25	1	0.6	0.06	0.15
430F (Se)	0.12	16-18	1.25	1		0.06	0.06
434	0.12	16-18	1	1	0.75-1.25	0.04	0.03
436	0.12	16-18	1	1	0.75-1.25	0.04	0.03
442	0.2	18-23	1	1		0.04	0.03
446	0.2	23-17	1.5	1		0.04	0.03

### **2.6.3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS.**

Los aceros inoxidable son magnéticos. La fuerza de aceros inoxidable ferríticos se puede aumentar en el trabajo en frío, pero no en el tratamiento térmico. Estas aleaciones poseen la ductilidad considerable, capacidad de ser trabajados en calor o frío y una excelente resistencia a la corrosión y son relativamente baratos por no contener Níquel.

Las aleaciones que contienen el cromo de 16 a 18% son probablemente las más usados de los aceros al cromo, debido a su formación y características.

Se usan como materiales de construcción general en los que se requiere su especial resistencia al calor y la corrosión.

Se utilizan extensivamente para el equipo de la cocina, la maquinaria de lecherías, el trabajo decorativo interior, los ajustes del automóvil, y el equipo químico para resistir la corrosión del ácido nítrico.

El más utilizado de los aceros inoxidable ferríticos es el Tipo 430, que contiene 16 a 18% de cromo y un máximo de 0,12% de carbono. Entre sus aplicaciones, se puede mencionar: cubiertos, vajillas, cocinas, piletas, monedas, revestimientos, mostradores frigoríficos.

Su contenido de cromo es superior al de los aceros inoxidable Martensíticos lo cual mejora la resistencia a la corrosión en diversos medios, pero sacrifica en parte otras propiedades, como la resistencia al impacto.

### **2.6.3.3. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.**

La resistencia a la corrosión es buena, aunque las aleaciones ferríticas no resisten a los ácidos reductores tales como HCl.

Las soluciones suavemente corrosivas y los medios oxidantes se manejan satisfactoriamente. El tipo 430 tiene una aplicación amplia en plantas del ácido nítrico. El aumento del contenido del cromo entre a 25 al 30% mejora la resistencia a las condiciones oxidantes a temperaturas elevadas.

Estas aleaciones son útiles para todos los tipos de piezas del horno no sujetadas a la alta tensión. Son atractivos porque proporcionan buena resistencia a la corrosión líquida y a la oxidación a alta temperatura y son más baratos que los austeníticos, además de poseer buena resistencia a la corrosión tipo pitting y a la corrosión bajo tensión. Sin embargo tienen varias limitaciones.

Los aceros inoxidable ferríticos contienen, de un modo general, un tenor de cromo superior al de los martensíticos.

Este aumento en la cantidad de cromo mejora la resistencia a la corrosión en diversos medios, pero sacrifica en parte otras propiedades, como la resistencia al impacto.

Tiene una resistencia excelente a las picaduras (pitting) inducidas por cloruro, han probado ser una solución práctica frente a la corrosión bajo tensión (SCC) en cloruros aun en caliente, y tienen buen resultado frente a la corrosión por ácidos orgánicos y en medios cáusticos.



## **2.6.4. ACEROS INOXIDABLES DUPLEX.**

### **2.6.4.1. GENERALIDADES.**

La denominación DUPLEX se aplica los aceros inoxidable, cuya composición química ha sido cuidadosamente ajustada para lograr una estructura cristalina mixta, de aproximadamente mitad de fase ferrita y mitad de fase austenita.

Esto se logra incorporando a un acero ferrítico, una cantidad pequeña y controlada de níquel (a veces Mn y N). La aleación resultante presenta características mecánicas muy superiores a la de un acero inoxidable austenítico, permitiendo el uso de menores espesores, con el consiguiente ahorro de material y menor costo.

La familia de los aceros inoxidable DUPLEX se puede dividir en tres grandes categorías:

Aceros dúplex sin molibdeno, aceros dúplex 22Cr (con 22% de cromo) y aceros dúplex 25Cr (con 25% de cromo).

Los dúplex 22Cr han sido utilizados desde 1970 en las plataformas marinas, en la industria del petróleo. Desde fines de la década de los 80 los dúplex 25Cr (llamados superdúplex), de mayor resistencia mecánica, se han ido introduciendo gradualmente en ese campo.

La principal razón para evolucionar hacia los aceros dúplex es el costo.

Su menor porcentaje de níquel (un elemento caro) y una mayor resistencia mecánica, que permiten ahorrar hasta un 25% en peso, reducen el costo de una instalación.

### **Grados Más Comunes.**

**2205** 22Cr con un 3% de molibdeno y un 0.17% de nitrógeno. El contenido de cromo, níquel y molibdeno le confiere una gran resistencia a la corrosión uniforme y corrosión por picadura y grietas, en ambientes de cloruro. Muy superior a un 316, 316L o 317. También presenta una gran resistencia a la corrosión bajo tensión en ambientes de sulfuro de hidrógeno. El contenido de nitrógeno mejora la resistencia a la corrosión de las soldaduras, no siendo necesario el tratamiento térmico después de soldar. Su resistencia mecánica ( $S = 90$  ksi) es aproximadamente el doble de la de un acero inoxidable austenítico, lo que permite utilizar menores espesores y economizar en material. Posee una buena soldabilidad y mayor dureza (247 Brinell).

Se puede utilizar las mismas técnicas de soldadura de los aceros austeníticos (SMAW, TIG, MIG, plasma) pero con ciertas precauciones. También puede ser trabajado en frío, pero con mayor dificultad que un acero austenítico por su mayor límite elástico.

Es resistente a ácidos reductores diluidos (ácido sulfúrico) y a ácidos oxidantes en concentración media a alta.

Resiste ácidos orgánicos diluidos pero a mayores concentraciones y altas temperaturas se debe tener precaución.

Mientras que los aceros inoxidable ferríticos son prácticamente inmunes al cracking causado por cloruros, los aceros inoxidable austeníticos que contienen níquel son muy susceptibles a este tipo de corrosión. Los aceros dúplex se comportan en forma intermedia.

**2304** Pertenece al grupo de aceros dúplex sin Mo, de alta resistencia mecánica ( $S = 91$  ksi) y dureza (230 Brinell), perfectamente equilibrado en su composición para lograr aproximadamente 50% de fase ferrita y 50% de fase austenita. La austenita es estable y se restituye espontáneamente en la zona afectada por el calor en una soldadura. El alto contenido de cromo le confiere una gran resistencia a la corrosión por picaduras, por grietas y corrosión uniforme. Su microestructura dúplex garantiza una gran resistencia a la corrosión bajo tensión.

Puede ser trabajado (formado) en frío, al igual que los aceros austeníticos, pero con mayor esfuerzo debido a su mayor límite elástico ( $Y = 60$  ksi).

El trabajo en frío produce un endurecimiento de la aleación. También puede ser trabajado en caliente (1100-950 °C) seguido por un recocido y templado. Durante su uso, no debe ser expuesto a temperaturas sobre 300 °C por períodos largos de tiempo.

Tiene buena soldabilidad sin requerir tratamiento térmico después de la soldadura. Como electrodo puede usarse tanto 2304 como 2205.

El cloruro puede producir corrosión bajo tensión especialmente a alta temperatura en los aceros inoxidable austeníticos, el acero 2304 por su estructura dúplex, es mucho más resistente a este tipo de ataque.

El bajísimo contenido de carbono evita la precipitación de carburos y nitruros de cromo, en los límites de grano, al ser calentado durante la soldadura (fenómeno responsable de la corrosión intergranular). Después de la soldadura, la austenita se restituye espontáneamente manteniéndose el equilibrio de la aleación.

Sus aplicaciones: Tubos intercambiadores de calor, evaporadores, digestores, cañería para agua, calentadores de agua, tanques para agua caliente, contenedores de carga.

**2507** Pertenece al grupo de los aceros dúplex 25Cr o supe dúplex con un 4% de molibdeno y un 0.27% de nitrógeno. El mayor contenido de cromo, níquel y molibdeno le confiere una mayor resistencia a la corrosión uniforme y corrosión por picadura y grietas, en ambientes de cloruro. Su resistencia mecánica también es ( $S = 108$  ksi).

Los aceros dúplex son más susceptibles a la precipitación de carburos, entre granos de la aleación, que los aceros austeníticos.

Las operaciones normales de soldadura y calentamiento la microestructura no forma ningún precipitado o fase que pueda producir fragilidad.

Tiene buena soldabilidad con las técnicas SMAW, TIG, PAW, SAW. Como material de relleno debe usarse un metal que preserve la estructura dúplex.

Tiene excelente resistencia a la corrosión por ácidos inorgánicos y ácidos orgánicos como ácido fórmico y ácido acético. Tiene mayor resistencia a las picaduras por cloruro debido al mayor nivel de cromo, molibdeno y nitrógeno. Sus aplicaciones: Plantas petroquímicas, plantas desalinizadoras, industria de petróleo y gas, intercambiadores de calor, estructuras en ambientes marinos, equipos para purificación de gases de combustión, sistemas de agua contra incendio en plataformas de perforación.

**TABLA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS INOXIDABLES DUPLEX**

<b>Nombre</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>N</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
AISI329	28	4.5	1.5	-	0.1	2	0.04	0.03	1
3RE60	18.5	4.9	2.7	0.07	0.03	1.5	0.03	0.03	1.7
2304	23	4.5	0.3	0.1	0.02	-	0.04	0.04	-
2205	22	5.5	3	0.17	0.02	0.7	0.025	0.001	0.4
2507	25	7	4	0.27	0.02	1.2	0.035	0.02	0.8
Ferrallium 255	25.5	5.5	3.4	0.2	0.04	1.6	0.04	0.03	0.7
Zeron 100*	24-26	6-8	3.4	0.3	0.03	1	0.03	0.01	1
7Mo Plus	26-29	3.5-5.2	1-2.5	0.15-0.35	0.03	2	0.035	0.01	0.6

\* El Zeron 100 además de estos elementos contiene 0.5 – 1 de Wolframio y Cobre

#### **2.6.4.2. PROPIEDADES MECANICAS**

Las propiedades de los aceros dúplex son muy sensibles a variaciones en la composición química especialmente de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno.

El molibdeno y el nitrógeno son importantes en determinar la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas, mientras que el níquel es fundamental para mantener el equilibrio ferrita/austenita de la aleación.

Estos aceros tienen mayor resistencia al ataque del cloro, mayor resistencia a la tracción y a la elongación que los aceros austeníticos y ferríticos. Buena formabilidad y soldabilidad. Se utilizan especialmente en ambientes marinos cuando las temperaturas son algo elevadas plantas de desalinización, intercambiadores de calor y plantas petroquímicas.

La resistencia a la fluencia de las aleaciones dúplex es dos a tres veces mayor y la resistencia a la tracción 25% más grande, mientras que mantienen buena ductilidad a temperaturas normales de operación.

Las aleaciones dúplex también ofrecen:

- Resistencia a la corrosión general y por picado, igual o mejor que la del tipo 316 L, en muchos ambientes corrosivos.
- Resistencia a la corrosión intergranular, debido al bajo contenido de carbono.
- Buena resistencia a la erosión y abrasión.
- Un coeficiente de expansión térmica cercano al del acero al carbono, lo cual puede resultar en menores tensiones en las soldaduras que involucren inoxidable dúplex con acero al carbono.

Los más nuevos grados dúplex combinan la alta fuerza, buena dureza, alta resistencia a la corrosión, buena resistencia al cloruro SCC.

#### **2.6.4.3. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.**

Presentan una resistencia superior a la corrosión uniforme y localizada, como corrosión por picaduras (pitting), corrosión en grietas (crevice) y corrosión bajo tensión (SCC), en los casos más críticos de altas concentraciones de cloruro, presencia de fuertes agentes reductores y presencia de sulfuro de hidrógeno.

#### **2.6.5. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN.**

##### **2.6.5.1. GENERALIDADES.**

Estos son aleaciones de hierro-cromo-níquel que contienen elementos de aleación tales como columbio, cobre, molibdeno, aluminio y titanio.

Se pueden endurecer por un tratamiento de envejecimiento a una temperatura moderadamente elevada.

Este tipo de acero inoxidable se encuentra en bobinas, hojas, tiras placas, tochos para forjar, barras, varillas y alambres. Debido a que la resistencia no varía con el tamaño de la barra y puede reproducirse para cualquier espesor.

Las operaciones del maquinado final pueden efectuarse antes del tratamiento térmico, si se tiene en cuenta el ligero crecimiento que ocurre.

La industria aeronáutica utiliza mucho este tipo de acero por su elevada razón resistencia / peso y a su resistencia a altas temperaturas.

**TABLA 7. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN.**

<b>UNS</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
S13800	0.05	0.1	0.01	0.008	0.1	12.25-13.25	7.5-8.25	2-2.5
S15500	0.07	1	0.04	0.03	1	14-15.5	3.5-5.5	
S17400	0.07	1	0.04	0.03	1	15-17.5	3-5	
S17700	0.09	1	0.04	0.04	0.04	16-18	6.5-7.75	

## **2.6.6. ACEROS ESPECIALES.**

### **2.6.6.1. GENERALIDADES.**

Un grupo especial de aceros y aleaciones muy resistentes a la corrosión por picaduras y grietas, características del cloruro, son aquellos con una cantidad adicional de molibdeno (6% o más). Dentro de esta categoría está el acero Austenítico (o superaustenítico) 254 SMO.

#### **Acero Inoxidable 254 SMO**

El alto nivel de molibdeno como también de cromo y nitrógeno confieren al acero 254 SMO una alta resistencia a la corrosión por grietas y picaduras. El contenido de cobre mejora su resistencia a la corrosión en ciertos ácidos y su alto contenido de níquel en combinación con los niveles de cromo y molibdeno le dan una resistencia a la corrosión bajo tensión (SCC).



Los altos niveles de cloruro, bromuro o fluoruro de ciertas disoluciones requerían del uso de materiales de alto valor, como ciertas aleaciones de níquel y titanio. El 254 SMO surgió como una alternativa más económica para manejar agua de mar a temperaturas ambiente y ligeramente superior. El acero 254SMO resiste el ataque en disoluciones de cloruro ácidas y oxidantes como las existentes en las plantas blanqueadoras de pulpa en la industria de celulosa.

Debido a su alto contenido de nitrógeno, el acero 254SMO tiene una resistencia mecánica superior ( $S = 94.3$  ksi) que la mayoría de los otros aceros inoxidable austeníticos (304,  $S = 75$  ksi) y posee una soldabilidad, ductilidad y resistencia al impacto comparables.

Su bajo contenido de carbono evita la precipitación de carburos durante la soldadura y la correspondiente corrosión intergranular. Sólo el ácido nítrico concentrado y caliente podría producir problemas de corrosión, en las soldaduras.

El agua de mar es más corrosiva que una disolución estéril de cloruro de sodio, de igual concentración, en lo que a corrosión por grietas se refiere.

La presencia de micro – organismos forma una película biológica mucosa (entre 25 – 30 °C) que aumenta el riesgo de corrosión. Por esta razón y para evitar el bloqueo de los sistemas, se acostumbra “clorarla” con hipocloritos o cloro gaseoso.

Un contenido de cloro residual de hasta 1ppm a 30°C puede ser soportado sin problema por el acero 254 SMO.

Son usados en intercambiadores de calor, cañerías para agua de mar. Equipos para plantas blanqueadoras de pulpa de celulosa. Equipos para el lavado de gases. Contenedores de disoluciones con alto contenido de cloruro. Equipos para la destilación de petróleos con alto contenido de azufre.

### **3. TIPOS DE CORROSIÓN QUE AFECTAN A LOS ACEROS INOXIDABLES.**

#### **3.1. CORROSIÓN UNIFORME.**

La corrosión uniforme se presenta en los aceros inoxidable por la ruptura uniforme de la película pasiva o protectora sobre toda la superficie expuesta. Entonces tiene lugar la corrosión del hierro o elemento mayoritario del acero inoxidable y el aspecto gris – metálico mas o menos brillante de esta aleación se convierte en un material oscuro y muy quebradizo, propios del enlace iónico de los óxidos de hierro.

Este tipo de corrosión se presenta en los aceros inoxidable cuando estos son introducidos en hornos a altas temperaturas en atmósfera de hidrogeno, monóxido de carbono o sulfuro de hidrógeno. También ocurre al sumergirlos en ácido clorhídrico y ácido fórmico. Se presenta en diversos casos tales como: Corrosión Atmosférica, a Alta Temperatura, en Sales Fundidas, por Corrientes Parásitas, por Metales Líquidos

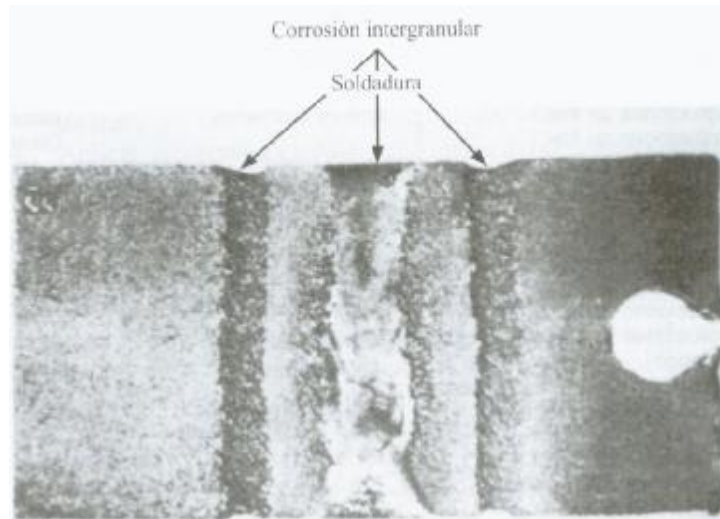
#### **3.2. CORROSIÓN INTERGRANULAR.**

La corrosión íntergranular se manifiesta, generalmente, en ambientes ácidos en presencia de agentes oxidantes o en ambientes alcalinos, caracterizándose por el arranque de los granos, a partir de la superficie en contacto con el agente agresivo.

Cuando un acero inoxidable es calentado a alta temperatura y luego dejado enfriar en forma no controlada (lo que ocurre durante una soldadura), es posible que se precipiten compuestos como carburos de cromo (combinación entre carbono y cromo). Esto se ve al microscopio como "granos" incrustados en la masa del acero. La zona "intergranular" es una zona pobre en cromo en donde la capa protectora de óxido de cromo, responsable de la propiedad "inoxidable", es muy débil o no existe. Esta zona "entre granos" es débil y muy susceptible a la corrosión por agentes químicos. Como la corrosión penetra "entre los granos", el material se debilita o se fatiga, disminuyendo su resistencia mecánica.

Las "zonas afectadas por la temperatura" son especialmente sensibles a la corrosión intergranular. Los aceros inoxidables corrientes (304, 316), están expuestos a este tipo de corrosión si durante la manufactura de partes y piezas, se utiliza soldadura para unir las partes.

La zona afectada por el calor, queda sensibilizada y debe estrictamente ser sometida a un tratamiento térmico adecuado (recocido a disolución) para restituir su resistencia a la corrosión. Esto no siempre es posible, por lo cual se han desarrollado aceros especiales para ser usados "tal cual" después de soldados. Estos son los aceros inoxidables de bajo carbono (304L, 316L, etc.) distinguidos por la letra L y los aceros estabilizados (por adición de Ti, Cb, etc.) tales como 316Ti, 310Cb, 321, 347 en que el elemento estabilizante tiene más afinidad por el carbono que el cromo, evitando la precipitación de carburo de cromo a alta temperatura.



**FOTO 13. Corrosión intergranular de una soldadura de acero inoxidable. Las zonas deterioradas de soldadura han sido mantenidas en el rango de temperatura crítico necesario para la precipitación del carburote cromo durante el enfriamiento.**

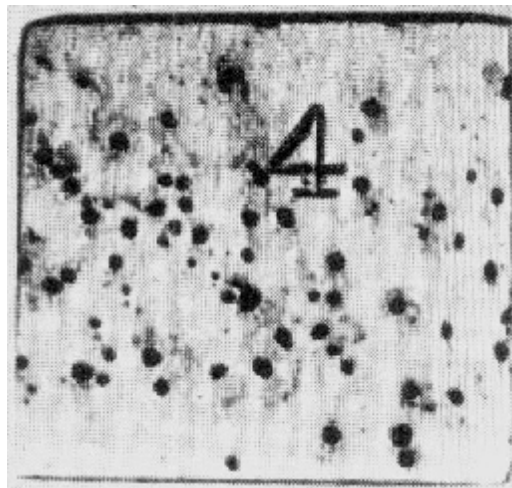
### **3.3. COROSION POR PICADURA.**

Bajo ciertas condiciones de utilización, los aceros inoxidables que serian aparentemente inmunes al ataque corrosivo en algunas soluciones, puede fallar, por corrosión por picadura, en puntos bien característicos.

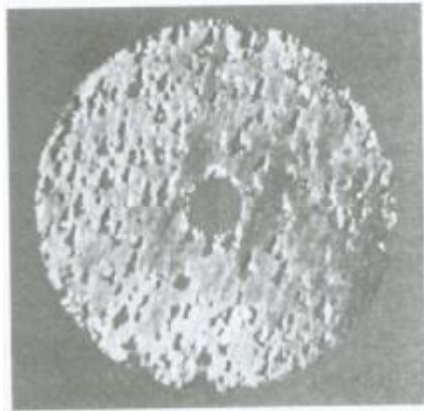
Las causas más comunes son el estado de limpieza del acero inoxidable y la presencia del ión cloruro, presente en muchas aguas naturales y fluidos industriales. El fenómeno de pitting se inicia por una destrucción localizada de la capa de óxido (de cromo o de molibdeno) que pasiva al acero, por parte del ión cloruro.

El metal así expuesto se corroe. Como consecuencia de esta corrosión, se produce una concentración local, dentro de la picadura que se está formando, de cloruro y ácido, impidiendo el acceso del oxígeno al interior del poro, lo que contribuye a acelerar más la velocidad de corrosión dentro del poro. Una picadura, una vez iniciada, se propaga con mucha rapidez pudiendo perforar una pared de acero inoxidable, en corto tiempo. El acero inoxidable necesita una concentración de cloruro límite mínima, sobre la cual se observará corrosión por picadura.

Los aceros inoxidables con adiciones de molibdeno (tipos 316 y 317) tienen mejor resistencia a la corrosión por picado, comparados con otros aceros inoxidables.



**FOTO 14. Ejemplo de corrosión por picaduras del acero inoxidable 18-8, por el ácido sulfúrico que contiene el cloruro férrico.**



**FOTO 15. Picadura de un acero inoxidable en un medio corrosivo muy agresivo**

### **3.4. CORROSIÓN GRIETAS.**

Los aceros inoxidable son particularmente sensibles al ataque en grietas. La falta de oxígeno y la acumulación de ácidos y agentes contaminantes, dentro de las grietas es la principal causa de este problema.

Similar a la corrosión por picadura, la corrosión en grieta ocurre más comúnmente en soluciones de cloruros y los aceros con contenidos de molibdeno, son más resistentes. La concentración de cloruro dentro de la grieta, destruye la capa pasiva de óxido, con esta capa protectora destruida se propaga la corrosión al metal base.

### **3.5. CORROSIÓN GALVÁNICA.**

En los aceros inoxidable, la resistencia a la corrosión es reducida cuando están en contacto con metales como el plomo, níquel, cobre y grafito. Por otro lado quedan mas protegidos cuando entran en contacto con hierro, otros aceros, aluminio, zinc o cadmio.

Mientras más separados estén dos metales en la serie galvánica mayor será la corrosión que experimente el menos noble de ellos al ponerse en contacto eléctrico, dentro de una misma disolución. También influyen temperatura y área (a mayor temperatura y menor área mayor velocidad de corrosión).

La corrosión de un eje de acero inoxidable bajo un o-ring, es el resultado de la pérdida de la pasivación del acero por fricción con el o-ring, que origina una diferencia de potencial respecto al resto del eje que permanece pasivado, originando así una corrosión galvánica del eje bajo el o-ring. La corrosión galvánica puede ser evitada, aislando eléctricamente las partes metálicas de materiales diferentes.

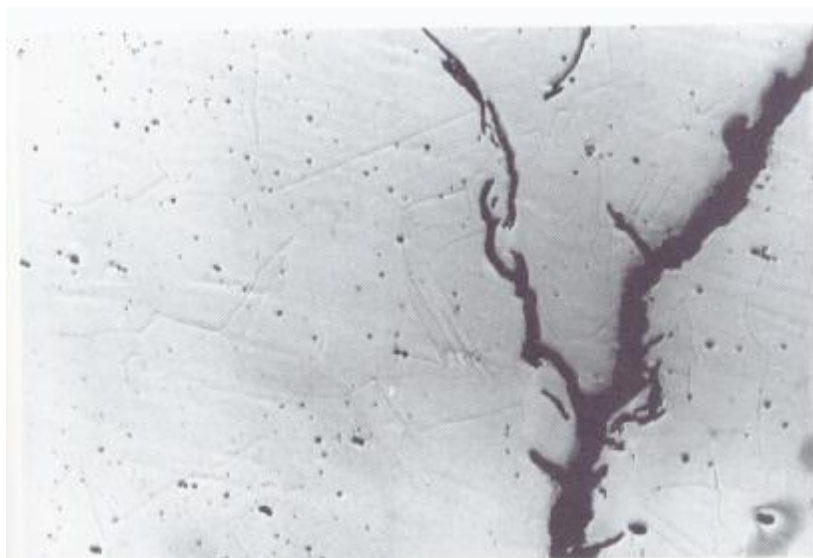
### **3.6. CORROSIÓN BAJO TENSION.**

La corrosión bajo tensión en los aceros inoxidables solamente ocurre bajo ciertas condiciones ambientales específicas. Las soluciones con cloruro o álcalis son las más comúnmente conocidas. La presencia de oxidantes en el ambiente tiene gran influencia en la tendencia a la fisura. Los siguientes ambientes son los que provocan más corrosión bajo tensión en los aceros inoxidables:

- Soluciones de HCl,  $MgCl_2$ ,  $BaCl_2$ .
- Soluciones de NaCl –  $H_2O_2$ , Agua de mar.
- $H_2S$ , Soluciones de NaOH -  $H_2S$ .
- Vapores condensados de agua con cloruros.



El comportamiento frente a este tipo de corrosión de los aceros inoxidable es primariamente independiente del grado de níquel de la aleación y de la tensión de fluencia. Aceros inoxidable con límites de fluencia bajos son relativamente inmunes a la fisura causada por cloruros cuando no contienen níquel o el rango de este elemento es superior al 30%.



**FOTO 16. Corrosión bajo tensiones del acero inoxidable austenítico en agua con cloruros.**

### **3.7. CORROSIÓN POR EROSION.**

Aquellas superficies de acero inoxidable que están en contacto con algún fluido corrosivo en movimiento (cuerpo de una bomba, propulsor de una bomba, asiento de una válvula, boquillas, etc.) sufren un tipo especial de corrosión.

El fluido puede producir un desgaste o "erosión" de la capa pasiva de óxido de cromo en el acero inoxidable en algún punto, exponiendo el metal base a la acción del agente corrosivo. También se produce erosión cuando un fluido transporta partículas de sólido que chocan a gran velocidad contra la superficie de acero, rompiendo la capa pasiva de óxido.

### **3.8. CORROSIÓN POR CAVITACION.**

Cuando la rotura de la película pasivante de los aceros inoxidables se debe a las implosiones de las burbujas de vapor, entonces este tipo de corrosión se denomina cavitación.

La dureza y el acabado superficial son factores que mejoran considerablemente la resistencia a la cavitación, pero es muy importante el buen diseño de la instalación.

### **3.9. CORROSIÓN POR HIDRÓGENO.**

En los aceros inoxidables martensíticos y los aceros inoxidables endurecidos por precipitación y expuestos en medios de sulfuros se produce el agrietamiento por hidrógeno, que en parte tiene un mecanismo muy parecido al de corrosión bajo tensión. El ión sulfuro favorece la reducción de los iones hidrógeno a átomos de hidrógeno. Estos se adsorben en la superficie del acero inoxidable y después se adsorben en su interior a través de límites de grano y de límites de fase.

Los átomos de hidrogeno al llegar a una zona con defectos de red, al encontrar espacio, se convierten en moléculas y estas ejercen presión creciente hasta originar verdaderas grietas.

### **3.10. CORROSIÓN POR FATIGA.**

Cuando el acero inoxidable está sometido a esfuerzos alternos de compresión y tracción en medio corrosivo se presenta la corrosión por fatiga, puesto que en estas condiciones desaparece o disminuye el límite de fatiga.

Los aceros inoxidables se caracterizan por su elevada resistencia a la corrosión por fatiga, ya que el cromo aumenta el límite de fatiga en medios corrosivos. Pero los aceros inoxidables con tratamiento tienen riesgo de experimentar este tipo de fallos.

## **4. PRUEBAS Y ENSAYOS DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES.**

### **4.1. ENSAYO HUEY PARA ACERO INOXIDABLE.**

Este ensayo (ASTM A – 262) consiste en una exposición del material en HNO<sub>3</sub> al 65% en ebullición durante 5 periodos de 48 horas. Un acero sensibilizado presenta una corrosión pronunciada. Las velocidades de corrosión aceptadas son 18 mpy para acero 304 templado, 30 mpy para CF – 8 (304 de colada) Y 24 mpy para acero 304L, después de una sensibilización de una hora a 1250 °F. Este ensayo es muy útil para verificar la calidad del acero inoxidable. En algunos casos, se usa ácido maleico, ácido láctico, ácido sulfúrico mas sulfato de cobre y ácido sulfúrico mas sulfato férrico para determinar la susceptibilidad de acero inoxidable a la corrosión intergranular.

### **4.2. ENSAYO STREICHER PARA ACERO INOXIDABLE.**

Como el ensayo Huey es caro y requiere mucho tiempo, se desarrolló este ensayo que consiste en un pulido de una probeta pequeña hasta papel esmeril No. 000, seguido por un ataque electrolítico en ácido oxálico al 10% durante 1.5 min. con una densidad corriente anódica de 1 A/cm<sup>2</sup>. Finalmente se observa la superficie con un aumento de 250 a 500. Un vaso de acero inoxidable puede servir de cátodo.

Si la estructura observada presenta un ataque homogéneo en pequeños escalones, el tratamiento térmico del material fue correcto. Si se observan zanjas en la estructura, el material es susceptible a una corrosión intergranular.

#### **4.3. ENSAYO WARREN.**

El acero 316L (con Mo) presenta algunos problemas especiales en relación con el ensayo Huey, debido a la formación de una fase sigma durante una sensibilización de 1 Hora a 1250 °F, especialmente cuando hay ferrita en la estructura del material templado. La corrosión en la prueba Huey es muy alta y no se acepta el material, a pesar de que no hubo precipitación de carburos de cromo. El ensayo Warren se efectúa en una solución de 10% HNO<sub>3</sub> + 3% HF A 70 – 80 °C durante 2 periodos de 2 horas o durante 5 periodo de ½ hora. Este medio corrosivo ataca severamente materiales con carburos precipitados, pero no con fase sigma. Si la relación entre la velocidad de corrosión de material sensibilizado y la velocidad de corrosión del material templado es inferior a 1.5, se acepta el acero con respecto a la precipitación de carburos. La fase sigma no se considera nociva para la corrosión en la mayoría de los medios corrosivos.

#### **4.4. ENSAYO DE CORROSIÓN INTERGRANULAR PARA CAÑERÍAS.**

La norma ASTM A262 da los detalles de estos ensayos aplicados a aceros Austeníticos para determinar su susceptibilidad a la corrosión intergranular, mediante la acción de diversas soluciones corrosivas de ensayo (práctica A, B, C, E, F). Algunos ensayos permiten clasificar visualmente los resultados como aceptable o no-aceptable. Otros en cambio dan información cuantitativa en base a pérdida de peso, que permite determinar la susceptibilidad relativa a la corrosión intergranular, de diferentes materiales.

## **5. TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO INOXIDABLE.**

Los Propósitos que debe tener el tratamiento térmico de los aceros inoxidable son: producir cambios en la condición física, cambios en las propiedades mecánicas y nivel de tensiones residuales, también sirve para restaurar la máxima resistencia a la corrosión cuando esta propiedad ha sido afectada por un calentamiento o un proceso de fabricación.

Los hornos y procedimientos son los mismos que para los tratamiento de otros aceros, el control de la atmósfera es importante, no por la descarburación de estos aceros, excepto los Martensíticos, sino por la carburación de los aceros Austeníticos; en general se usan atmósferas exotérmicas, de nitrógeno y vacío.

### **5.1. ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS.**

No se pueden endurecer por temple, si se puede hacer tratamiento térmico aunque esto no es deseable porque se fragilizan y la ductilidad y tenacidad a temperatura ambiente se reducen drásticamente, los elementos como Mo, Si, Ni y Mn, hacen que este constituyente se forme con contenidos mas bajos de cromo. Cuando las aleaciones Fe-Cr con 15%-70% Cr se someten a calentamientos prolongados a temperaturas entre 400 y 540 °C, se endurecen y experimentan una pérdida de ductilidad.

El fenómeno se llama fragilidad de 445 °C, porque el pico de dureza ocurre a esta temperatura. Los aceros con mas del 16% de Cr no se deben usar a temperatura entre 370 °C y 540 °C, especialmente si hay fluctuaciones entre estos valores y la temperatura ambiente. Cuando los aceros inoxidable de alto Cr con contenidos medios o altos de intersticiales se calientan por encima de 950 °C y se enfrían hasta temperatura ambiente pueden exhibir una gran fragilidad y perdidas de la resistencia a la corrosión, esto puede ocurrir durante la soldadura, los Tratamientos isotérmicos por encima de 950 °C y en las operaciones de vaciado. Este fenómeno se debe fundamentalmente a la precipitación de carburos y nitruros ricos en cromo, causada al aliviarse la saturación cuando las aleaciones se exponen a alta temperatura, esta precipitación ocurre sobre las dislocaciones y mas comúnmente sobre los límites de grano. Estos aceros dependen fundamentalmente del nivel de intersticiales C y N presentes en la aleación. El fenómeno anterior es el responsable de la pérdida de la resistencia a la corrosión de los aceros ferríticos intersticiales con altos contenidos intersticiales cuando se calientan a mas de 950°C, En este caso la precipitación carbonitruros de Cr empobrece la matriz de cercana a los límites de grano, al rebajar el contenido de cromo por debajo de 11.5% estas zonas se hacen oxidables ocurriendo la corrosión intergranular, este mismo fenómeno ocurre en los Austeníticos.



La principal limitación en el uso de los aceros Ferríticos ha sido pérdida de ductilidad y resistencia a la corrosión luego de someterse a altas temperaturas durante la soldadura o los tratamientos isotérmicos, el problema de fragilidad se puede tolerar y se presenta en tiempos de exposición largos para ocasionarlos. Un material que no tenga buena ductilidad y resistencia a la corrosión es poco útil estructuralmente. La principal causa de esta limitación tiene que ver con los átomos intersticiales C y N. Para remediar este problema se sugiere lo siguiente:

1. Adiciones para ablandar la soldadura: Adicionar elementos que contengan un 15% del radio atómico desde a matriz alfa, como la presencia de pequeñas cantidades (0.1-1.3% de Cu) V, Al y combinaciones de estos elementos para obtener aleaciones de Fe-Cr con buena soldabilidad y niveles elevados de intersticiales hasta 700 ppm. Una aleación de 35% de Fe tendrá una buena ductilidad y buena resistencia a la corrosión con intersticiales de 250 ppm, mientras sin aditivos solo tolerarían 10 a 15 ppm.
2. Estabilización de los intersticiales: para controlar los intersticiales se debe añadir elementos mas fuertes formadores de carburos y nitruros que el cromo como lo son el Ti, Nb, Zr y Ta. De esta manera el cromo se mantiene en solución.

La precipitación de los carburos y nitruros no mejora el comportamiento frente al impacto en estado recocido, pero prevé excelente resistencia a la corrosión y ductilidad después de soldar.

3. Obtener bajos contenidos de intersticiales: reducir los valores de los intersticiales hasta lo mínimo. Se han desarrollado técnicas para producir intersticiales más bajos como la fusión por inducción bajo vacío (VIM), la descarburación con argon-oxígeno (AOD). y la refinación por haz de electrones (EBHR). Que permitieron pasar de un contenido de C+N >600 ppm en un horno eléctrico a contenidos de 300 ppm con AOD y por 100 ppm en otros métodos. Así se desarrolló la generación de los aceros inoxidables Ferríticos de extra bajos intersticiales que tuvieron aceptación en el uso de agua de mar. Las aleaciones ferríticas son más resistentes a la corrosión que las austeníticas.

Los aceros ferríticos EBI son inmunes a la corrosión bajo tensión en soluciones de cloruros, y tienen inmunidad a la corrosión intergranular, buena resistencia al picado y excelente resistencia a la corrosión generalizada y en ácidos orgánicos.

Las limitaciones de uso de estos aceros radica en la temperatura de uso 320°C y se requieren grandes precauciones para soldarlos. Estos aceros no se endurecen por temple, por el contrario desarrollan dureza mínima y máxima ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión.

El tratamiento térmico que se le aplica a los ferríticos es un recocido de alivio de tensiones causado por deformación en frío.

El recocido debe ser a menos de 800°C, estos aceros con mas del 14% de Cr pueden formar la martensita cuando se enfrían a temperaturas superiores a 800 °C y se evitan estas temperaturas superiores debido al crecimiento de grano con pérdida de tenacidad.

## **5.2. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.**

Este tipo de aceros inoxidable no son endurecibles por tratamiento térmico, a altas temperaturas se genera un crecimiento de grano, y no se puede regenerar por tratamiento térmico. Para todos los aceros Austeníticos se recomienda el TT de Recocido completo para aliviar tensiones cuando se forman en la deformación en frío o en caliente.

El TT debe tener en cuenta la expansión térmica de estos aceros, 50% mas alta que en los aceros ordinarios, la operación se realiza calentando hasta una temperatura adecuada donde los carburos se precipitan entre 425 y 900°C que esta cerca de los 1100 °C, el tiempo de permanencia debe ser 30 min por cada sección de 25 mm, para evitar deformaciones, y su enfriamiento debe ser rápido, preferiblemente en agua, si hay peligro de distorsión se puede usar aire.

Si el tratamiento anterior no se hace bruscamente (cambio de temperatura) y si se hace lentamente si el % de C es alto los carburos se precipitan entre 425 y 900° C, el tiempo para que ocurra la precipitación depende de el % C y el medio corrosivo en que se encuentre el metal, esto se denomina sensibilización.

Este es un problema grave porque ocurre un ataque químico  $(FeCr)_{23}C_6$ , en los límites de granos. Este carburo contiene un 70% de Cr empobrece la matriz reduciendo la resistencia a la corrosión. La corrosión comienza en los límites de grano, luego se presenta hacia los planos de deslizamiento.

### **5.3. ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.**

Son tratados térmicamente con el fin de conseguir diferentes propiedades en diversos niveles de dureza y resistencia mecánica.

Al reducir el C del anterior surgió el 410 de 0.15%C el cual se puede recocer y revenir para producir diversos valores de dureza, se le añade selenio o azufre y mejora la maquinabilidad. 416 y 420F.

El tratamiento térmico de los martensíticos es semejante que al de los del carbono donde dependen del contenido de carbono y la templabilidad es tan grande que en secciones de 30cm de espesor se puede lograr máxima dureza en el núcleo después de templar al aire.

Para conseguir la mejor resistencia a la corrosión se debe tener en cuenta el tiempo de permanencia para la disolución de los carburos.

Se debe evitar la descarburación, el crecimiento de grano excesivo, la austenita retenida, la fragilidad y las grietas de temple. Se usa 1 H por 25mm de sección. Para evitar la precipitación de los carburos deben templarse en aceite. En aceros de elevado tenor de Cr como el 440 y 420 se usan para resistir la corrosión, esta propiedad se ve afectada por un revenido a alta temperatura y por ello el alivio de tensiones se hace a temperaturas bajas.

#### **5.4. TRATAMIENTOS TERMICOS.**

##### **5.4.1. RECOCIDO DE SOLUBILIZACIÓN.**

Si en la matriz del acero inoxidable Austenítico se ha producido precipitación de carburos, o no tiene microestructura de grano equiaxial debido a un proceso de fabricación por hechurado, es necesario un tratamiento térmico que consiga disolver los carburos y regenerar la microestructura y, en consecuencia, restaurar las características mecánicas, así como la adecuada resistencia a la corrosión: este tratamiento se denomina recocido de solubilización.

Consiste en calentar el acero a una temperatura suficientemente elevada para eliminar las alteraciones microestructurales, mantenerlo a esa temperatura durante el tiempo necesario para que se produzcan estas modificaciones así como la solubilización de los carburos, y enfriarlo con la suficiente velocidad para evitar nuevamente la precipitación de los carburos.

En realidad es un hipertemple como el que se practica antes del envejecimiento del duraluminio, por ejemplo.

#### **5.4.2. SENSIBILIZACIÓN.**

La sensibilización, en realidad, es un tratamiento térmico que no reporta ningún beneficio al acero inoxidable, utilizándose únicamente para ensayar la posible susceptibilidad del material a la corrosión intergranular.

Consiste en mantener al acero en el margen de temperaturas de 450 a 850 °C el tiempo suficiente para que se produzca la precipitación de los carburos de cromo.

Cada acero inoxidable tiene su propia gráfica de sensibilización. Se trata de representaciones temperatura-tiempo-corrosión (TTC), obtenidas de modo análogo al de las curvas temperatura-tiempo-transformación (TTT).

El tiempo de permanencia necesario para evidenciar la sensibilización depende de la temperatura, del contenido en carbono y de la presencia ausencia de elementos estabilizantes en la composición del acero.

##### **5.4.2.1. Teorías de Sensibilización.**

1. Empobrecimiento del cromo en la matriz donde el bajo contenido de cromo en el área adyacente al límite de grano hace que quede menor del 12% de Cr donde puede mantenerse la pasividad.

2. La diferencia de cromo contenido entre la matriz y el carburo  $M_{23}C_6$ , o la zona empobrecida, origina una celda galvánica donde el carburo actúa como ánodo y la matriz como cátodo.
3. Teoría de la deformación unitaria: esta se presenta en función de la desorganización cristalográfica de los granos adyacentes al ajuste con el carburo  $M_{23}C_6$  el cual produce un ataque químico en uno de los lados del límite de grano, el más deformado.

#### **5.4.2.2. Remedios Posibles Contra La Sensibilización.**

1. Rebajar el contenido de C para no formar grandes cantidades de carburos que se precipiten.
2. Añadir un elemento que forme un carburo más estable que el de Cr y que sea insoluble en la austenita. El 321 con Ti(5X %C Mínimo), y el 347 Nb+Ta=10X C min para laminas por su mejor superficie, estos dos son ideales para estructuras soldadas.
3. Usar estructuras dobles alfa y gamma donde si hay cromo, se le añade Mo o se le rebaja el níquel, en estos aceros el C es insoluble en la ferrita y por lo tanto los carburos precipitan a temperaturas elevadas.

4. En el trabajo en frío del acero proporciona muchos lugares de nucleación para la precipitación de los carburos, así que esta no ocurre solo en los límites de grano y se elimina el ataque intergranular, en el trabajo en frío se reduce la resistencia a la corrosión.
5. Recocer durante largo tiempo para que el cr se difunda otra vez hacia las zonas empobrecidas. Aunque buena teoría pero en la práctica no es muy útil.
6. El mejor método es disolver los carburos y homogeneizar la austenita con un TT de recocido de homogeneización para los 304L 316L y 347 para mayor resistencia a la corrosión.

#### **5.4.3. RECOCIDO DE ELIMINACIÓN DE TENSIONES.**

Elimina las tensiones residuales que hayan sido producidas por procesos de moldeo, hechurado, mecanizado, etc., o mejora, en consecuencia la resistencia a la corrosión bajo tensiones.

Consiste en calentar el material a una temperatura inferior a 450<sup>0</sup>C durante un tiempo de media hora a dos horas y posteriormente enfriado en aire.

#### **5.4.4. ESTABILIZACIÓN.**

Es un tratamiento que se utiliza cuando se desea una gran resistencia a la corrosión en los aceros que contienen titanio y niobio.



Consiste en calentar el material a una temperatura comprendida entre 840 y 900 °C durante más de dos horas. Con ello se consigue la precipitación de los carburos de titanio y niobio con el consecuente empobrecimiento en carbono de la matriz.

De este modo se evita una posterior precipitación de carburos de cromo, que empobrecería la matriz en este elemento y no podría formar-se el óxido de cromo protector.

#### **5.4.5. RECRISTALIZACIÓN.**

La temperatura de tratamiento, tanto en el caso de deformación previa en caliente como en el caso de deformación en frío, se sitúa por debajo del punto de inicio de transformación de la ferrita en austenita.

El margen de temperatura utilizado es de 750 a 850 °C.

En el caso de materiales que hayan sufrido una deformación en caliente, y en los que, por tanto, además de regenerar la microestructura hay que eliminar la martensita, se necesitan largos tiempos de permanencia para disolverla.

Para el caso de materiales deformados en frío, en los que únicamente hay que regenerar la microestructura, los tiempos de permanencia se acortan de forma importante.

#### **5.4.6. TEMPLE.**

Los aceros martensíticos son susceptibles de experimentar el tratamiento térmico del temple.

Con este tratamiento se pretende inhibir la transformación de la austenita en ferrita y, en consecuencia, formar martensita, con lo que se obtiene elevada dureza y resistencia mecánica.

Consiste en calentar el acero inoxidable hasta una temperatura suficiente para convertir la microestructura en austenita, mantenerlo a esta temperatura durante cierto tiempo, necesario para la disolución total de los carburos y, finalmente, enfriar rápidamente. La velocidad de enfriamiento debe ser superior a la que se obtendría si se bajara de la temperatura de austenización a temperatura ambiente.

El calentamiento para llegar hasta la temperatura de temple conviene hacerlo de forma lenta con objeto de evitar tensiones y conseguir una distribución homogénea de temperatura en todo el espesor de la pieza. En algún caso se hacen necesarias etapas de precalentamiento.

Generalmente, después del temple se practica el revenido; calentamiento a temperatura inferior al recocido, que tiene por objeto eliminar las tensiones ocasionadas por la formación de la martensita. El tratamiento que comprende el temple y el revenido se denomina bonificado.

#### **5.4.7. ENVEJECIMIENTO**

El envejecimiento es el proceso en el cual varían las propiedades de las aleaciones sin cambiar sensiblemente su microestructura. Se conocen dos tipos de envejecimiento: térmico y por deformación.

El envejecimiento térmico se produce al variar la solubilidad del carbono en el hierro a en función de la temperatura. Con un enfriamiento rápido desde 650 -700 °C en los aceros al bajo carbono, la separación de carbono en forma de cementita ternaria puede ser retrasada dando lugar como resultado, a la disolución sólida sobresaturada. Al pasar el tiempo el carbono tiende a separarse de la disolución. La velocidad de difusión del carbono a temperatura ambiente es suficiente para que éste se desprenda en forma de cementita ternaria después de una permanencia prolongada en ella.

Al mismo tiempo, después del temple la dureza y resistencia y empeoran las características de plasticidad y resiliencia.

Pese al bajo contenido en carbono, el aumento de la dureza del acero puede alcanzar el 50 %. Este aumento de dureza, que se debe a la descomposición de la disolución sobresaturada, recibe el nombre de solidificación por dispersión. Además del acero, esta puede advertirse en una serie de otras aleaciones en las cuales la solubilidad de un elemento en el otro varía en función de la temperatura. Si la variación de a dureza, resistencia y plasticidad se dan a temperatura ambiente, semejante envejecimiento se llama natural. Pero cuando este proceso transcurre a elevada temperatura se llama envejecimiento artificial.

Al ascender la temperatura de calentamiento aumenta la velocidad de los procesos de difusión que ocurren en el envejecimiento, lo cual reduce considerablemente el tiempo que dura éste.

El envejecimiento por deformación (mecánico) se produce después de la deformación plástica en frío. Para finalizar este proceso son necesarios 15,16 o más días a temperatura ambiente y varios minutos a 200 - 350 °C.

Durante la deformación plástica del acero algunas zonas del hierro quedan sobresaturadas con carbono y nitrógeno. Al pasar el tiempo se desprenden de éstas los nitruros y carburos. Aparte de eso, en los aceros pueden tener lugar simultáneamente los envejecimientos térmico y por deformación.

Debido al proceso de envejecimiento por deformación se empeoran las propiedades de estampación del acero en chapas. Por esta razón, muchos aceros al carbono se someten a los ensayos para determinar su capacidad de envejecimiento por deformación.

## **6. COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA EN ACEROS INOXIDABLES.**

Se entiende por soldabilidad la facilidad con que un metal se puede conformar por soldadura de sus partes, así como la habilidad de la unión soldada para resistir las condiciones de servicio. La soldabilidad de los aceros inoxidable fluctúa desde excelente para los austeníticos hasta mala para los martensíticos.

Los aceros inoxidable deben ser manejados con un poco más de cuidado que los aceros ordinarios, en el corte y montaje. El cuidado que se tome en la preparación para la soldadura será tiempo bien usado, lo que incrementará la calidad de la soldadura y la terminación del producto, lo cual dará un óptimo rendimiento en servicio.

Los procedimientos mas utilizados para soldar los aceros inoxidable son: Soldadura al arco con electrodo de tungsteno protegido por gas inerte (TIG), Soldadura al arco con electrodo metálico consumible protegido por gas inerte (MIG), Soldadura al arco con electrodo revestido, Soldadura de arco sumergido y Soldadura al plasma. Estos procedimientos consisten en obtener una adecuada protección para impedir la formación de óxidos refractarios, para lo cual se recurre a atmósferas<sup>9</sup> neutras o ligeramente reductoras.

### **6.1. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.**

Las características físicas de los aceros al carbono y los inoxidables austeníticos son bastante diferentes. El punto de fusión de los grados austeníticos es menor, así que se necesita menos calor para lograr la fusión. Su resistencia eléctrica es mayor que la de los aceros comunes, por lo que se requiere menos corriente eléctrica para la soldadura. Este tipo de aceros inoxidables tienen un coeficiente de conductividad térmica menor, lo cual causa que el calor se concentre en una zona pequeña adyacente a la soldadura.

Los aceros inoxidables austeníticos también tienen coeficientes de expansión térmica aproximadamente 50% más grandes que los aceros al carbono, lo cual requiere más atención en el control de la distorsión y deformación.

### **6.2. ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.**

Este tipo de acero tiene ciertas características en común en su comportamiento a la de los aceros suaves, cuando están sujetos a las temperaturas encontradas en la soldadura.

Su punto de fusión es aproximadamente 2900 °F, en comparación con los 2800 °F (1537 °C), de los aceros suaves (Aceros al carbono AISI 1020,1045, A36, etc.). Esto se puede entender ya que ellos necesitan menos calor para su ablandamiento y son más suaves al fundir con una rata de calor equivalente a la de los aceros al carbono.

Los coeficientes de expansión y contracción térmica son muy similares y no tienen cambios significativos cuando se funde, con respecto al acero al carbono.

La tasa de conductividad térmica es menor en un 50% a la de los aceros al carbono normales; y dependiendo del incremento de temperatura, esta es similar a la de los grados que contienen cromo y níquel (aceros inoxidable austeníticos).

Su resistencia a la conductividad eléctrica es alta y aproximadamente la mitad a los aceros al carbono; es por esto que se necesita la mitad del amperaje para los procedimientos de soldadura.

Los aceros inoxidable martensíticos pueden ser soldados en algunas de las siguientes condiciones; ya sea endurecidos, templados, semiendurecidos, etc.

Indiferente de cual sea la condición prioritaria, la soldadura puede producir endurecimiento martensítico en la ZAC (zona afectada por el calor), el cual depende principalmente del alto contenido de carbono en el material; este grado de endurecimiento puede ser controlado cuando se realice un procedimiento de soldadura en particular.

Este defecto se puede reorganizar, corrigiendo la curva de gradiente térmico, tratando de acentuar la tasa de conductividad del calor, que causa intensos esfuerzos que se desarrollan por cambios en la expansión térmica o volumétrica; inducidos por las transformaciones que sufre la estructura cristalina.

Estos defectos severos son suficientes para producir fracturas en la zona soldada.

### **6.3. ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS.**

Los aceros inoxidable ferríticos tienen varios problemas que se acentúan más o menos dependiendo de la aplicación.

Excesivo crecimiento de grano por encima de 950 °C el proceso de crecimiento de grano se intensifica por la falta de la recristalización del Cambio Alotrópico de Ferrita a Austenita de estos Aceros. El grano grueso tiene menos ductilidad y menos Tenacidad que el grano fino. En estos casos la única manera de afinar el grano sería con un tratamiento de recristalización con deformación plástica previa solo aplicable a productos semielaborados. En el caso de Soldadura esto no puede realizarse y por ello en materiales donde la soldadura es parte del proceso de fabricación el crecimiento de grano es un problema serio.

Sensitización. Los Aceros Inoxidables Ferríticos pueden a veces, ya sea por segregación del Cr, o por estar muy cerca del bucle Gamma, no ser totalmente ferríticos generando en el calentamiento a mas de 900 °C algo de Austenita en borde de grano ferrítico.



Si luego de esta transformación se los enfría rápidamente la austenita formada se transformará en Martensita disminuyendo algo la plasticidad pero por sobre todo disminuyendo la resistencia a la corrosión del borde de grano, por ello a estos aceros, para mejorarles su resistencia a la corrosión se los debe enfriar lentamente desde una temperatura de aproximadamente 1000°C.

Pérdida de ductilidad por presencia de fase Sigma A medida que se aumenta la proporción de Cr para mejorar la resistencia a la corrosión, nos acercamos peligrosamente a la transformación de Fe- $\alpha$  fase sigma ( $\varphi$ ) de estructura cristalina tetragonal, que predice el diagrama de equilibrio Fe-Cr. La fase sigma ( $\varphi$ ) es un ínter metálico duro y frágil que fragiliza a toda la estructura. La fase sigma se forma durante el enfriamiento en el rango de 8700 C/ 530 °C y puede ser redisuelta con calentamientos del orden de 1100 °C y su formación evitada por un enfriamiento rápido que retenga la fase de alta temperatura (Fe- $\alpha$ ). Ya que la fase sigma es un ínter metálico más rico en Cr que la Ferrita su presencia puede afectar la resistencia a la corrosión por una disminución del Cr disuelto en la matriz.

En aceros inoxidable ferríticos con Mo aparece otra fase relacionada á sigma llamada fase Chi, entre los 550-590 °C con una composición nominal Fe<sub>2</sub>CrMo aunque hay desviaciones de los valores estequiométricos. La fase Chi precipita mas rápidamente que la sigma, siempre acompaña a la fase sigma y reduce los valores de tenacidad a la entalla de aceros inoxidable ferríticos.

#### **6.4. ACEROS DUPLEX**

Cambios microestructurales debido a la practica de la soldadura.

En la zona afectada por el calor de la soldadura adyacente a la frontera de la fusión, la fase austenítica ( $\gamma$ ), es transformada en ferrita ( $\delta$ ) durante la aplicación de la soldadura, generando un crecimiento de grano de las fases. La extensión de estos cambios depende principalmente de la temperatura de transición y su tope máximo, que esta gobernado por la composición del acero y el ciclo térmico de soldadura en una localización específica.

En el enfriamiento, la fase Austenítica se reforma en la fase ferrítica, inicialmente en los límites de grano y subsecuentemente en medio de los granos de ferrita. La extensión de la reversión y los cambios morfológicos de la fase Austenítica, también depende de la composición del acero, el tiempo y temperatura; adicionalmente, influyen la formación de carburos, carbonitruros, nitruros y endurecimiento de las fases mas disueltas, durante los ciclos térmicos de soldadura; además la precipitación<sub>1</sub> de los granos son determinados por la composición del acero, su inicial micro estructura y la naturaleza de los ciclos térmicos. Naturalmente se necesita mucha experiencia para establecer pasos de ciclos térmicos en la ZAC, pues adicionalmente la fase Austenítica tiende a formarse mas aya de la precipitación de los granos o carburos.

Efecto de la soldadura en los aceros inoxidables Dúplex. La soldabilidad de las aleaciones de segunda generación se han mejorado sustancialmente a través de agregados controlados de nitrógeno y al desarrollo de metales de aporte enriquecidos en níquel.

Usando unos pocos controles en los procedimientos de soldadura, se obtienen soldaduras sólidas, con una resistencia a la corrosión comparable al metal de base.

#### **6.5. ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN.**

Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación están clasificados por UNS por las series 100, 350, 360, 450 y 455. Su uso es muy acotado y el fabricante lo entrega con el tratamiento térmico ya realizado. Los hay de estructura austenítica, martensítica y semiaustenítica. Los martensíticos y semiausteníticos son austeníticos a alta temperatura. Los martensíticos templan a Ms entre 100 °C y 150 °C mientras que para los semiausteníticos Ms se encuentra debajo de temperatura -70 °C. En este caso para inducir la transformación Martensítica se puede temprar hasta -100 °C, deformar plásticamente en frío o calentar a 650 °C /850 °C para precipitar carburos de los aleantes y así disminuir la cantidad de estabilizantes de la fase austenítica y elevar Ms.

Pueden ocurrir, cambios en la estructura de estos aceros cuando están sujetos a una localización del calor de la soldadura y es muy importante notar la condición del metal base previo a la soldadura, es decir si esta templado, tratado en solución o endurecido.

## **7. SELECCIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES.**

La selección de materiales es una consideración objetiva de los parámetros de diseño, este proceso comienza escogiendo una categoría de material, luego se elige el material o aleación óptima para la aplicación dada teniendo en cuenta un balance óptimo entre resistencia ductilidad y demás propiedades.

Para que una selección de materiales esté completa hay que tener en cuenta los factores de degradación del ambiente, reacciones químicas, la corrosión, el daño por radiación y el desgaste.

La elección de un tipo de acero Inoxidable, para atender a una aplicación específica debe ser hecha con criterio y obedecer a varios parámetros, como resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas, costo total y disponibilidad del producto.

### **7.1. CONDICIONES FAVORABLES PARA EL USO DE ACEROS INOXIDABLES.**

- Algunos ambientes corrosivos.
- Temperaturas muy bajas (criogénicas).
- Temperaturas elevadas.

- Alta resistencia mecánica vs. poca masa.
- Si se requieren condiciones higiénicas gran facilidad de limpieza.
- Apariencia estética no se oxida y no requiere pintura.
- Resistencia a la abrasión húmeda.
- Las propiedades no-magnética de los inoxidables austeníticos.
- No contamina previene reacciones catalíticas.
- Excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia y suficiente ductilidad.

## 8. INSPECCIÓN

La evaluación de la corrosión sirve como un medio en el cual se generan recomendaciones técnicas para que en caso de encontrar algún equipo o tubería en condiciones que represente un riesgo para la continuidad del proceso o para el personal, se pueda corregir oportunamente mediante la aplicación de métodos de control, reparaciones o reemplazos o cualquier acción preventiva. Lo anterior siempre apoyado por los requerimientos de los códigos y los estándares de diseño y construcción.

Algunas de las técnicas de evaluación aplicadas son: Inspección visual, pruebas no destructivas.

La inspección es un programa de examinación crítica del equipo e instalaciones para averiguar su condición actual y para determinar si es conveniente continuar con el servicio. La inspección también puede predecir la vida remanente del equipo. Para asegurar su objetivo y seguridad, la inspección deberá incluir el registro cuidadoso y el seguimiento de recomendaciones.

Las inspecciones ayudarán a encontrar los problemas antes de que ocurran las fallas.

### **8.1. TECNICAS DE INSPECCION SUPERFICIAL.**

Mediante éstas sólo se comprueba la integridad superficial de un material. Por tal razón su aplicación es conveniente cuando es necesario detectar discontinuidades que están en la superficie, abiertas a ésta o a profundidades menores de 3 mm. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos no destructivos:

- INSPECCION VISUAL ( VT)
- LIQUIDOS PENETRANTES (PT)
- PARTICULAS MAGNETICAS (MT)
- ELECTROMAGNETISMO (ET)

#### **8.1.1. INSPECCIÓN VISUAL (VT).**

Esta es una técnica que requiere de una gran cantidad de información acerca de las características de la pieza a ser examinada, para una acertada interpretación de las posibles indicaciones. Está ampliamente demostrado que cuando se aplica correctamente como inspección preventiva, detecta problemas que pudieran ser mayores en los pasos subsecuentes de producción o durante el servicio de la pieza.



Aún cuando para ciertas aplicaciones no es recomendable, es factible detectar muchos problemas en casos determinados, mediante la inspección realizada por una persona bien entrenada.

Algunas herramientas empleadas para la inspección visual son:

- Lentes de aumento o lupas
- Endoscopios (Boroscopios)

El costo de la inspección visual es el más bajo de todos los ensayos no destructivos, siempre y cuando sea realizada correctamente.

### **8.1.2. LÍQUIDOS PENETRANTES (PT).**

La inspección por líquidos penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados.

En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

El método puede detectar discontinuidades superficiales, siempre y cuando se tenga una parte abierta a la superficie en la cual el líquido ha sido aplicado.

El objetivo del método de líquidos penetrantes es detectar grietas, porosidades, traslapes, costuras y otras discontinuidades superficiales rápida y económicamente con un alto grado de confiabilidad.

Este método puede aplicarse a materiales metálicos; por ejemplo: fundiciones de acero, aluminio y sus aleaciones, en materiales no metálicos como vidrio, cerámica, plásticos, etc.; además de piezas de forma complicada que no pueden ser inspeccionadas por otro método o cuando las piezas a inspeccionar se localizan en lugares donde no existe energía eléctrica.

El éxito de la inspección depende de la limpieza de la superficie, de las piezas, de la ausencia de contaminación, de las condiciones de la superficie y del cuidado de los operadores para asegurar que se efectúe la técnica de manera adecuada y se realice la interpretación correcta de las indicaciones.

### **8.1.3. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MT).**

Las partículas magnéticas detectan discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos.

Es un sistema más rápido que los PT y consiste en aplicar una sustancia ferromagnética en polvo (partículas magnéticas) sobre un material que ha sido magnetizado. Las zonas donde existe una discontinuidad en el material provocan distorsiones del campo magnético o de los polos magnéticos.

Esas distorsiones atraen a las partículas magnéticas y de este modo se crean las indicaciones virtuales de las discontinuidades, que posteriormente podrán interpretarse.

#### **8.1.4. ELECTROMAGNETISMO (ET).**

Electromagnetismo, también conocido como corrientes de Eddy, es principalmente aplicable a materiales no ferromagnéticos y se basa en el fenómeno de inducción electromagnética.

Funciona a partir de un generador de corriente alterna, que se conecta a una bobina de prueba para crear un campo magnético primario. El campo magnético primario induce una corriente eléctrica en el material sujeto a inspección y esto provoca un campo magnético secundario, proporcional al primario, pero de signo contrario. En el momento en que la corriente de la bobina se vuelva cero, el campo magnético secundario inducirá una nueva corriente eléctrica en la bobina. Este efecto se repetirá cuántas veces la corriente cambie de fase (al pasar de positivo a negativo y viceversa).

Las variaciones de la conductividad eléctrica causan modificaciones en la corriente inducida del material sujeto a inspección; lo que ocasionará que varíe su campo magnético inducido, hecho que será detectado por la variación del voltaje total que fluye en la bobina.

Existen otro tipo de técnicas para la inspección de la corrosión llamadas técnicas de inspección volumétrica, las cuales están comprendidas también dentro de las pruebas no destructivas.

## **8.2. TECNICAS DE INSPECCION VOLUMETRICA**

Son aquellas con las que se comprueba la integridad de un material en su espesor y se detectan discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos:

- RADIOGRAFIA INDUSTRIAL (RT).
- ULTRASONIDO INDUSTRIAL (UT).

### **8.2.1. RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL (RT).**

La radiografía industrial es un método físico de inspección. Se basa en la interacción entre la materia y la radiación electromagnética. Cuando un cuerpo es expuesto a la energía de los rayos X o gamma, éste los absorbe de forma proporcional a su densidad, espesor y configuración.

La radiación que logra atravesar el material examinado se registra en una placa sensible a dicha energía. Posteriormente la placa se revela y así se obtiene la imagen del área inspeccionada, en la que las indicaciones de una discontinuidad aparecerán en un tono de gris o negro distinto al de las porciones de material homogéneo y saludable porque al no haber material que atravesar o tener éste otra composición; será distinta la cantidad de energía ionizante que atraviese esa parte de la pieza y se imprima en la placa fotosensible.

La radiografía industrial es un excelente medio de registro de inspección y su uso se extiende a diversos materiales.

Además la radiografía industrial también descubre los errores de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas.

### **8.2.2. ULTRASONIDO INDUSTRIAL (UT)**

La examinación por Ultrasonido Industrial (UT) se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, basado en la impedancia acústica; que se obtiene al conocer el producto de la velocidad máxima de propagación de una onda sonora específica entre la densidad de un material.

Uno de los instrumentos más utilizados para este propósito es el "DMS" (KRAUTKRAMER) que es un instrumento de medición de espesores por ultrasonido (prueba no destructiva).

El "DMS" es un medidor portátil de espesores y registrador de datos construido a base de microprocesadores. Usando palpadores de uno o dos cristales, el "DMS" puede medir espesores de paredes remanentes en un amplio rango de componentes, incluyendo tubo flux, tuberías, recipientes a presión y otras partes sujetas a pérdidas de espesores debido a corrosión o erosión.

Con el método de medición de un cristal, las mediciones pueden hacerse a través de recubrimientos, tales como pinturas y excluye el espesor de dicho recubrimiento en la medición.

Las mediciones de espesores y las imágenes correspondientes al barrido tipo "A" (ecos que emite el haz ultrasónico), pueden ser almacenadas en la memoria del circuito de datos alfanuméricos de alta capacidad.

Una interfase serial bidireccional permite transferir los datos a una impresora o computadora, incluyendo las imágenes del barrido tipo "A" y una programación remota del "DMS" por una computadora personal.

El principio de operación de un medidor de espesores por ultrasonido, es que el instrumento mide el tiempo de recorrido de un pulso ultrasónico a través de la pieza prueba y multiplica este tiempo por la velocidad del sonido en el material.

### **8.3. TECNICAS PARA EVALUAR CORROSIÓN.**

Para determinar que tanta corrosión esta ocurriendo en los elementos y tuberías, es necesario evaluar primero el tipo y la posible causa. Esta es la clave para establecer un adecuado programa para el control de la corrosión.

Algunas técnicas dan una medida directa de pérdida de metal o proporción de corrosión, mientras otros se usan para inferir que puede existir un ambiente corrosivo.

Las técnicas utilizadas para evaluar la corrosión son:

- Determinar los productos corrosivos en el sistema.
- Instalación de tuberías de prueba o nipples de corrosión.
- Instalación de cupones de corrosión.

- Mediciones de rata de corrosión (MPY).
- Resistencia eléctrica (Electrical Resistance - ER).
- Resistencia inductiva (Inductive Resistance).
- Resistencia de polarización lineal (Linear Polarization Resistance - IPR).
- Espectroscopia electroquímica de la impedancia (Electrochemical Impedance Spectroscopy - EIS).
- Análisis Armónico (Harmonic Analysis).
- Ruido Electromagnético (Electrochemical Noise - EN).
- Activación de la capa delgada (Thin Layer Activation - TLA).
- Emisión Acústica (Acoustic Emission - AE)
- Monitoreo del potencial de corrosión (Corrosion Potential Monitoring).
- Análisis Químico (Chemical Analyses)

### **8.3.1. DETERMINAR LOS PRODUCTOS CORROSIVOS EN EL SISTEMA.**

Este ensayo es una de las mejores técnicas para determinar tendencias en las ratas de corrosión ya que la cantidad de los productos corrosivos presentes, indican la gravedad de la corrosión.

Esta técnica consiste en tomar muestras del medio corrosivo para determinar sus componentes; el tomar continuas muestras acorta el tiempo necesario para la evaluación de la cantidad de agentes corrosivos presentes en el medio.

### **8.3.2. INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE PRUEBA O NIPPLES DE CORROSIÓN.**

El uso de nipples de corrosión es una técnica muy usada para simular una inspección visual de un sistema en operación. Este ensayo permite medir las tasas de corrosión pero no muestra el tipo de corrosión que afecta al sistema. Los nipples de corrosión son piezas de tubería instaladas en el medio a evaluar los cuales deben tener las siguientes especificaciones:

- La longitud de los nipples debe ser cuatro (4) veces el diámetro exterior del tubo.
- Deben ser instalados en el lugar donde la corrosión es más severa, durante un tiempo mínimo de treinta (30) días..

### **8.3.3. INSTALACIÓN DE CUPONES DE CORROSIÓN.**

Esta técnica es utilizada para evaluar la corrosión en operación. Por regla general, los cupones deben estar fabricados en el mismo material que esta formado el sistema y con dimensiones ya estipuladas.

Los cupones de corrosión se pesan inicialmente y luego son expuestos al medio corrosivo durante un periodo generalmente de treinta (30) días llamado “tiempo de exposición”, al cabo del cual se sacan y se limpian según procedimiento estándar, y luego se vuelve a pesar.



La pérdida del peso se calcula en base a la cantidad de corrosión ocurrida durante el tiempo expuesto. Los cupones de corrosión dan a conocer las ratas de corrosión, y también por medio de una inspección visual se puede determinar el tipo de corrosión que está ocurriendo.

#### **8.3.4. MEDICIONES DE RATA DE CORROSIÓN (MPY).**

La rata de corrosión es expresada como pérdidas de peso x área / tiempo o como la profundidad alcanzada en la superficie del metal en el tiempo de exposición.

Las unidades más utilizadas son:

- Penetración: (ipy) = pulgadas por año.  
(mpy) = pulgadas por año / 1000.
- Pérdida de peso (mdd) = miligramos por decímetro cuadrado por día.

La pérdida de peso es la medida básica y la penetración es calculada de la pérdida de peso basándose en la densidad del metal.

#### **8.3.5. RESISTENCIA ELECTRICA (ELECTRICAL RESISTANCE - ER).**

La técnica de resistencia eléctrica es uno de los métodos ampliamente usados para medir pérdida de material que ocurre en el interior de la planta y de tuberías.

Esta técnica opera midiendo el cambio en la resistencia eléctrica de un elemento metálico sumergido en medio de un producto de un elemento de referencia sellado dentro del cuerpo de la sonda.

Desde que el efecto de los cambios de temperatura de la resistencia de ambos, el elemento expuesto y protegido, midiendo la proporción de resistencia se minimiza la influencia de los cambios en la temperatura ambiente.

Por consiguiente, cualquier cambio neto de la proporción de la resistencia es solamente atribuible a la pérdida de metal del elemento expuesto una vez que se establece la temperatura de equilibrio.

Si la corrosión que ocurre en el elemento bajo estudio es aproximadamente uniforme, el cambio en la resistencia es proporcional a un incremento de corrosión. El método de ER satisface únicamente a los ambientes corrosivos que tienen electrólitos pobres o non-continuos como los vapores, gases, tierras, hidrocarburos y los líquidos no acuosos.

Un monitoreo por ER consiste en un instrumento conectado a una sonda.

El instrumento puede instalarse permanentemente para proporcionar la información continua, o puede ser portátil para recoger los datos periódicos de varias situaciones.

#### **8.3.6. RESISTENCIA INDUCTIVA (INDUCTIVE RESISTANCE).**

Las sondas de resistencia inductivas son similares a las sondas de ER pero mejoran la sensibilidad.

Los cambios de masa en el elemento del sensor son descubiertos midiendo los cambios en la resistencia inductiva de una bobina, localizada dentro del elemento. Las sondas de resistencia inductivas requieren la compensación de temperatura, similar a las sondas de ER.

Los sensores se pueden utilizar en una amplia gama de ambientes. Pueden ser considerados para la conductividad baja y los ambientes no acuosos, donde son inadecuadas las técnicas electroquímicas.

### **8.3.7. RESISTENCIA DE POLARIZACION LINEAL (LINEAR POLARIZATION RESISTANCE - LPR).**

La resistencia de la polarización es particularmente útil como un método para identificar la corrosión rápidamente y comenzar la acción de mantenimiento, prolongando la vida de la planta y minimizando el tiempo fuera de servicio no programado.

Esta técnica se ha usado con éxito durante treinta años, en casi todos los tipos de ambientes a base de agua, corrosivos. Una de las aplicaciones más comunes es el tratamiento de agua potable y sistemas de la distribución.

### **8.3.8. ESPECTROSCOPIA ELECTROQUÍMICA DE LA IMPEDANCIA (ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY - EIS).**

Espectroscopia electroquímica de la impedancia (EIS).

Se ha aplicado con éxito al estudio de los sistemas de corrosión por treinta años y ha demostrado ser un método de gran alcance y exacto para medir la corrosión. Los resultados de la polarización de EIS tienen que ser interpretados con la ayuda de un modelo del interfaz.

Una ventaja importante de EIS sobre otras técnicas de laboratorio es la posibilidad de usar señales muy pequeñas de amplitud que no son perceptibles.

Para hacer medida de EIS, una señal pequeña de la amplitud, se aplica sobre una gama de frecuencias de 0.001 hertzios a 100.000 hertzios.

### **8.3.9. ANALISIS ARMONICO (HARMONIC ANALYSIS).**

Esta técnica se relaciona al espectroscopio de impedancia electroquímico (EIS), en que una perturbación potencial alterna se aplica a un elemento del sensor.

En esta técnica no sólo se analizan la frecuencia primaria, sino que también el orden más alto las oscilaciones armónicas.

### **8.3.10. RUIDO ELECTROMAGNETICO (ELECTROCHEMICAL NOISE – EN).**

El uso del EN para la supervisión de la corrosión es muy atractivo. Las fluctuaciones del potencial o de la corriente de un espécimen metálico corrosivo son un fenómeno bien conocido y fácilmente observable y la evaluación del EN es una herramienta que se ha utilizado desde el año 1968. El estudio de las fluctuaciones potenciales de la corrosión fue aplicado, por ejemplo, para supervisar el inicio de los acontecimientos que caracterizaban la corrosión localizada tal como las picaduras o de corrosión bajo tensión (SCC), corrosión por erosión en diversos ambientes industriales. No hay otra técnica, electroquímica tan sensibles como el EN a los cambios y a los trastornos del sistema.

Durante la corrosión localizada el EN se cree puede ser generado por una combinación de procesos estocásticos, tales como acontecimientos de la interrupción de la pasivación y de la repasivación, y los procesos que pueden causar la propagación de la formación o del hoyo de la película.

La manera más tradicional de analizar datos electroquímicos del ruido ha sido transformar expedientes del tiempo en el dominio de la frecuencia para obtener espectros de energía.

### **8.3.11. ACTIVACION DE LA CAPA DELGADA ( THIN LAYER ACTIVATION – TLA ).**

Esta técnica desarrollada en el campo de la ciencia nuclear. Una pequeña sección de material se expone a un rayo de energía de partículas cargadas, lo que produce una capa de superficie radiactiva. Por ejemplo, un rayo de protón puede usarse para producir el isótopo radiactivo Co-56 dentro de una superficie de acero. Este isótopo se deteriora a Fe-56, con la emisión de radiación gamma. La concentración de especies radiactivas es tan baja, que las propiedades metalúrgicas de los componentes supervisados son inalteradas.

Los efectos radiactivos utilizados están en niveles muy bajos y no deben compararse con los de radiografía convencional. Las superficies radiactivas pueden producirse directamente en los componentes o en los sensores.

### **8.3.12. EMISION ACUSTICA (ACOUSTIC EMISSION - AE)**

Esta técnica consiste en medir la onda de los sonidos acústicos que se emiten durante el crecimiento de defectos microscópicos.

Los sensores pueden verse como micrófonos que son estratégicamente ubicados en las estructuras.

Las ondas acústicas se generan de las tensiones mecánicas generadas durante cambios de la presión o de temperatura. Los efectos de ruido de fondo tienen que ser tenidos en cuenta y pueden afectar las medidas.

La emisión acústica (AE) es una onda elástica transitoria generada por el lanzamiento rápido de la energía acumulada en los materiales tensionados. AE es un método dinámico de inspección que proporciona una respuesta al crecimiento de la discontinuidad bajo tensión estructural. AE puede detectar y evaluar discontinuidades y de una estructura entera durante una sola prueba. El método de AE se puede utilizar para prevenir la falla catastrófica del sistema con defectos desconocidos, y para limitar la presión máxima durante la operación de sistema.

#### **8.3.13. MONITOREO DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN (CORROSION POTENTIAL MONITORING).**

La medida del potencial de corrosión es un concepto relativamente simple, con el principio ampliamente usado en la industria para reforzar el monitoreo de la corrosión en acero en el hormigón y estructuras como las tuberías enterradas bajo protección catódica. El monitoreo de los sistemas de protección anódicos es otra área de aplicación. Los cambios en el potencial de corrosión también pueden dar una indicación del comportamiento de activo/pasivo en el acero inoxidable. El potencial de corrosión puede dar una indicación fundamental del riesgo termodinámico de la corrosión.

El potencial de corrosión se mide con respecto a un electrodo de referencia, caracterizado por un potencial estable del half-cell.

Un electrodo de referencia (y un sensor separado del material que se supervisará) son introducidos en el medio corrosivo para tomar estas medidas, o se establece una conexión eléctrica a la estructura junto con el electrodo externo de referencia.

#### **8.3.14. ANALISIS QUIMICO (CHEMICAL ANALYSES)**

Los diferentes tipos de análisis químicos pueden proporcionar valiosa información a los programas de monitoreo de corrosión. La medida de PH, conductibilidad, oxígeno disuelto, las concentraciones de ion metálicas, la alcalinidad del agua, la concentración de sólidos suspendidos, concentraciones de inhibidores, son un ejemplo.

Algunas de estas medidas pueden hacerse usando los sensores apropiados en línea.

### **8.4. INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA PARA SOLDADURA**

#### **8.4.1. GENERALIDADES.**

La inspección no destructiva se utiliza para evaluar la soldadura sin alterar sus condiciones de uso. En la soldadura se analizan las discontinuidades las cuales son una deficiencia en la estructura típica de un componente soldado tal como una falta de homogeneidad en las características metalúrgicas, mecánicas o físicas de un material o componente soldado.



Una discontinuidad es un defecto por lo que se hace la inspección para detectarlos.

#### **8.4.2. DISCONTINUIDADES.**

Las discontinuidades pueden generarse en el metal de soldadura, zona afectada por el calor y metal base del componente soldado, realizados en las cuatro uniones básicas de soldadura como a tope, en T, en esquinas y unión traslapada.

Las siguientes son las diferentes discontinuidades que se presentan en las soldadura:

##### **8.4.2.1. Porosidad.**

Es generada como resultado del gas que es atrapado en la solidificación del metal. La discontinuidad formada es generalmente esférica pero puede también ser elongada. A no ser que la porosidad sea excesiva, esta no se considera crítica como las discontinuidades agudas que causan concentraciones de tensiones. La excesiva porosidad es una señal de que los parámetros de soldadura, consumibles y el arreglo de la unión no están siendo apropiadamente controlados para el proceso de soldadura seleccionado o el material base está contaminado o existe una incompatibilidad de composición con el material de aporte utilizado.

#### **8.4.2.2. Inclusiones De Escoria.**

Son materiales sólidos no metálicos atrapados dentro del depósito de soldadura o entre el depósito y el material base. Pueden encontrarse en soldaduras ejecutada por varios procesos de arco. Las inclusiones de escoria resultan de inadecuadas técnicas de soldeo, fallas de diseño para proveer un adecuado acceso al soldar la unión o inadecuada limpieza entre pasos de la soldadura.

#### **8.4.2.3. Inclusiones De Tungsteno.**

Son partículas de tungsteno atrapadas en el depósito y son del proceso de soldadura de arco con electrodo de tungsteno.

Si el electrodo es introducido dentro del depósito líquido y si la corriente seleccionada es tan alta como para depositar gotas de tungsteno, resultan inclusiones de tungsteno, estas aparecen como marcas o áreas claras en la imagen radiográfica a causa de que su densidad es mayor que la del acero o aluminio y absorben mayor radiación. Casi todas las otras discontinuidades de soldadura se muestran como áreas oscuras sobre la imagen radiográfica.

#### **8.4.2.4. Fusión Incompleta.**

Es el resultado de una inadecuada técnica de soldeo, inadecuada preparación del metal base o inadecuado diseño de la junta.

Estas deficiencias causan fusión incompleta que incluyen insuficiente calor de la soldadura o falta de acceso a todas las zonas de fusión.

#### **8.4.2.5. Penetración Incompleta De La Unión.**

Ocurre cuando se presenta un faltante de metal del depósito en la penetración de la unión. Resulta por insuficiente calor de soldeo, inadecuado diseño de la junta. Las soldaduras en tuberías son especialmente vulnerables a este tipo de discontinuidad por lo que no existe acceso al interior del tubo.

#### **8.4.2.6. Socavado.**

El socavado es una acanaladura por fusión en la zona adyacente al metal base ya sea en la presentación o en la raíz de la soldadura y deja un vacío de metal de aporte.

Esta acanaladura crea una entalla mecánica, la cual es concentrador de tensiones. Cuando el socavado es controlado dentro de los límites especificados y no constituye en una entalla marcada o profunda, no se considera un defecto de soldadura.

#### **8.4.2.7. Concavidad.**

Es una depresión sobre la superficie de la presentación en la raíz de la soldadura, que se extiende por debajo del nivel de la superficie adyacente del material de base.

Se considera como una falta del soldador que debe llenar completamente el diseño de la junta tal como lo especifica el procedimiento de soldadura.

#### **8.4.2.8. Traslapadura.**

Es una sobremonta del material de depósito, ya sea en la raíz o en la presentación. Puede ocurrir como resaltado de una falta de control del proceso de soldadura, inadecuada selección del material de soldadura o inadecuada preparación del material base. Si existe óxido adherido firmemente sobre el material base que interfiere con la fusión, puede resultar también traslapadura.

La traslapadura es una discontinuidad superficial cuya forma es una entalla mecánica y casi siempre se considera rechazable.

#### **8.2.4.9. Laminaciones.**

Son planas generalmente discontinuidades alargadas en el metal base formado en el área central del espesor de los productos forjados. Las laminaciones pueden ser completamente internas y solamente detectados no destructivamente por inspección ultrasónica.

#### **8.2.4.10. Delaminaciones.**

Es la separación de una laminación bajo esfuerzo aplicado. Los esfuerzos pueden ser generados por soldadura o aplicados externamente.

Esta puede ser encontrada visualmente en los extremos del material o ultrasonicamente por ensayo con u explorador de haz normal.

#### **8.2.4.11. Costuras Y Traslapes.**

Son discontinuidades longitudinales en el Material y se encuentran en productos forjados, cuando la discontinuidad es paralela al esfuerzo principal. No es generalmente un defecto crítico.

#### **8.2.4.12. Desgarre Laminar.**

Son desgarres similares a fracturas en el material base con una orientación paralela a la superficie de forja son causados por las altas tensiones en la dirección del espesor generadas por la soldadura.

#### **8.4.2.13. Grietas.**

Ocurren en soldaduras y en el material base cuando esfuerzos localizados exceden la máxima resistencia del material. El agrietamiento está generalmente asociado con magnificación de esfuerzos cercanos a discontinuidades en la soldadura y el material base o cerca o entallas mecánicas asociadas con el diseño del elemento soldado.

#### **8.4.2.14. Garganta Insuficiente.**

Es una depresión sobre la cara del filete ocasionando que el depósito de garganta esté por debajo del tamaño del filete especificado; es una falla del soldador a alcanzar la fusión en el material base o de depositar suficiente material de aporte en el área de garganta.

#### **8.4.2.15. Convexidad Y Refuerzo De Soldadura.**

La convexidad es la configuración presente en la soldadura en filete descrita como la máxima distancia perpendicular desde la cara de un filete de soldadura convexo hasta la línea de unión de intersección de la soldadura.

#### **8.4.2.16. Cateto Insuficiente.**

Es un cateto de la soldadura en filete por debajo del tamaño para la cual está destinada la soldadura.

### **8.5. METODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA INSPECCIONAR SOLDADURA.**

La inspección no destructiva es un termino general utilizado para identificar todos los métodos de inspección que permiten evaluar las soldaduras y las zonas adyacentes sin destruir sus condiciones de uso.

Los métodos básicos son:

- 1- Inspección visual.
- 2- Líquidos penetrantes.
- 3- Partículas magnéticas.
- 4- Radiografía industrial.
- 5- Ultrasonido.
- 6- Corrientes de eddy.

### **8.5.1. INSPECCIÓN VISUAL.**

Para algunos tipos de soldadura, su integridad es verificada principalmente por inspección visual. Aun para los elementos soldados con uniones especificados para inspección completa por métodos de inspección no destructivo, la inspección visual, es el más frecuentemente utilizado de todos los métodos de inspección no destructivo es de fácil aplicación, rápido y muchas veces no requiere de equipos especiales distintos a una buena visión y algunos elementos relativamente económicos y sencillos.

A pesar de las muchas ventajas de la inspección visual, la mayor desventaja es la necesidad de un inspector que tenga considerable experiencia y conocimientos en algunas de las diferentes áreas, las cuales acompañan la inspección visual de soldadura.

El inspector debe estar familiarizado con planos, códigos, especificaciones, procedimientos de soldadura y requerimientos de calificación, estándares de fabricación y de todos los aspectos de una buena práctica de taller.

Se hace inspección visual antes de soldar durante y después de soldadura.

La inspección visual de soldadura, si es utilizado antes, durante y después de soldadura, provee la habilidad de eliminar la mayor parte de discontinuidades que podrían de otra forma aparecer en posterior Inspección no destructivo o en fallas durante el servicio.

### **8.5.2. INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES.**

Esta inspección es un método sensitivo para la detección y localización de discontinuidades, previendo que las discontinuidades estén abiertas a la superficie. El método utiliza un líquido coloreado penetrante, el cual es aplicado sobre la superficie que va ser inspeccionada y que penetra en la discontinuidad. Después de un adecuado tiempo de permanencia, el exceso de penetrante se remueve de la superficie y se seca la pieza. Un revelador es aplicado seguidamente, el cual actúa como un calcante dibujando el penetrante por fuera de la discontinuidad.

El penetrante aflora desde la abertura sobre la superficie, indica la presencia y localización de una discontinuidad.

Existen dos variedades del método del penetrante, utilizando ambos un principio similar; una variedad utiliza penetrante coloreado visible y el otro utiliza un coloreado fluorescente visible con luz ultravioleta.

### **8.5.3. INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

Se utiliza para la localización de discontinuidades superficiales o cercana a la superficie, en materiales ferromagnéticos. La inspección por partículas magnéticas está basada en el principio de las líneas de fuerza magnéticas que se distorsionan en la continuidad del material, por ejemplo una discontinuidad crea un campo de fuga magnética.



Una soldadura puede ser magnetizada por el paso de una corriente eléctrica a través de ella (magnetización directa) o por su disposición en un campo magnético (magnetización indirecta).

#### **8.5.4. INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA.**

Es un método de inspección no destructivo que utiliza la radiación para penetrar la soldadura y revelar información acerca de sus condiciones internas.

Cuando una soldadura es expuesta a la radiación penetrante algo de radiación será absorbida, algo dispersa y algo transmitida a través de la soldadura sobre un mecanismo de grabación.

La mayoría de las técnicas convencionales de inspección radiográfica utilizadas en la actualidad envuelven exposiciones que registran un imagen permanente o una película radiográfica; aunque otros métodos de grabación de imágenes son también utilizados.

El proceso básico de inspección radiográfica involucra dos etapas generales. la realización de la radiografía y su interpretación.

Los elementos esenciales necesarios para llevar a cabo estas dos operaciones consisten de:

1. Una fuente de radiación.
2. La soldadura a ser radiografiada.

3. Una película de rayos X Incluida en una carpeta a prueba de luz.
4. Una persona experimentada capaz de producir una exposición de película.
5. Un medio de químicos de procesado de la película expuesta.
6. Un persona experimentada capaz de interpretar la imagen radiográfica.

#### **8.5.5. INSPECCIÓN ULTRASÓNICA.**

Es uno de los métodos de inspección mas ampliamente utilizados; su primera aplicación es la detección y caracterización de discontinuidades superficiales definiendo vínculo de las características y para medición de espesores; el método Pulso-Eco con presentación de datos en Escan A es mas comúnmente utilizado en inspección de soldaduras. Este sistema utiliza una pantalla con tubo de rayos catódicos que visualiza la información del ensayo.

#### **8.5.6. INSPECCIÓN POR CORRIENTES DE EDDY.**

La inspección por corrientes de Hedí puede ser definido como un método de inspección no destructivo electromagnético en el cual pequeñas corrientes eléctricas, son inducidas en un material y cualquier cambio en el flujo de estas corrientes debido a heterogeneidades en el material son detectadas por una bobina cercana para subsiguiente procesamiento electrónico y presentación.

Es utilizado para inspección superficial y en algunos casos subsuperficial, la inspección de discontinuidades en soldaduras es solo una de sus muchas aplicaciones.

La técnica de corrientes de Eddy tiende además a ser sucesivamente aplicado en la medición de discontinuidad, tamaño de grano, dureza y espesor, identificación de material con diferente composición, microestructura, permeabilidad magnética y tratamiento térmico; y determinación de espesor de pintura y plateado en varios materiales

## **9. ELABORACION DE PLANES DE INSPECCIÓN Y ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.**

### **9.1. INSPECCION DE UNA TUBERIA POR LA QUE FLUYE CLORO SECO.**

Esta tubería es de acero inoxidable austenítico 304.

#### **9.1.1. PLAN DE INSPECCIÓN.**

1. Analizar hoja de vida de la tubería.
2. Retirar aislamiento térmico.
3. Se realiza una inspección visual para cerciorarse de la existencia de discontinuidades ( grietas, porosidades, corrosión, etc.).
4. Se realiza una inspección volumétrica, por medio de ultrasonido.
  - a. Se evalúa el cuerpo de la tubería y las uniones soldadas.

5. Después de esta inspección se le coloca a la tubería un nuevo aislante térmico.
  
6. Se presenta un informe donde se dan a conocer los resultados de las inspecciones realizadas, en el cual se incluyen las recomendaciones ya sean preventivas o correctivas.

### **9.1.2. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.**

Los aceros inoxidable de los tipos 300 tienen propiedades útiles para servicios con cloro seco a baja temperatura pero pueden fallar por corrosión bajo tensión, particularmente en presencia de humedad, al ambiente o a elevadas temperaturas.

En general las tuberías de acero al carbón o aleaciones de acero son las más recomendables para el manejo de cloro seco. El cloro seco es relativamente no-corrosivo para el acero al carbón, hierro colado y otros materiales comunes de construcción a temperaturas moderadas.

Aunque el titanio resulta adecuado para el cloro húmedo, éste reacciona violentamente con el cloro seco y nunca deberá ser usado.

El cloro húmedo es muy corrosivo para todos los metales comunes y deberá tenerse mucho cuidado al asegurarse que la humedad contenida en el cloro gaseoso seco sea mantenida por debajo del punto de rocío en todo momento.

El mantenimiento de los tanques y equipos para cloro deberá realizarse bajo la dirección de personal calificado. Todas las precauciones referentes a la instrucción de seguridad, equipo de protección, salud y riesgos de incendio deberán ser analizadas y comprendidas.

Los trabajadores no deberán intentar reparar las tuberías que transportan cloro u otros equipos que estén en período de servicio. Cuando un sistema de cloro va a ser limpiado o reparado, los tanques, las tuberías y los equipos se deberán purgar siempre con aire seco o con un gas no reactivo.

La descontaminación es especialmente importante donde se realizan operaciones de corte o soldadura ya que el hierro y el acero arden en el cloro cerca de los 483<sup>0</sup> F (251<sup>0</sup> C).

El mantenimiento correcto de un sistema de cloro requiere de una constante vigilancia, porque un descuido puede poner en peligro al personal, causando daño al equipo o la contaminación del proceso. A continuación se mencionan algunos consejos a tomar en cuenta.

- Revisar todas las tuberías, equipos y contenedores diariamente, y reparar las fugas inmediatamente. Si alguna fuga no puede ser controlada, tomar las medidas apropiadas de seguridad.

- Reparar una fuga puede requerir de soldadura. Antes de cualquier soldadura, purgar todas las líneas y equipos completamente, y analizar la minuciosidad de la purga (por dentro y alrededor de la tubería) con un explosímetro. El acero al carbón arde en el cloro a 483<sup>0</sup> F. De esta manera, sin purgar, puede dar comienzo a un incendio.

Purgar con aire seco y continuar con un flujo pequeño de aire durante la soldadura. Nunca soldar en un carro-tanque o cisterna.

- Un residuo amarillo verdoso o marrón, principalmente cloruro férrico, es un producto de la humedad en los cloroductos de acero. Si se permite su acumulación, este restringirá el flujo y puede con el tiempo obstruir la tubería. Para remover este residuo, limpiar la línea con grandes cantidades de agua hasta que el PH del agua de salida sea el mismo que el del agua de entrada.
- Las tuberías de cobre utilizadas en servicios de cloro pueden volverse quebradizas gradualmente. Revisar la flexibilidad de los conectores y reemplazarlos si éstos empiezan a perder flexibilidad o mostrar signos de severas ondulaciones.

Como parte de un buen programa global de mantenimiento preventivo, se deberá tomar en consideración el aseguramiento de que los siguientes puntos serán evaluados periódicamente, y corregidos como sea necesario:

- a. Condición de codos y rebordes
- b. Embalaje de válvulas de escape
- c. Válvulas de operación
- d. Condición del recubrimiento
- e. Condición de la pintura
- f. Condición de los soportes

La inspección visual realizada a los componentes de un circuito de tuberías que transportan cloro constituye un apoyo fundamental para examinar si dichas tuberías se encuentran en buen estado, la condición del recubrimiento anticorrosivo, y si éstas no presentan daños localizados en los puntos de apoyo. Con el resultado de la medición de espesores a los componentes del circuito de tuberías se puede tener una visión general de la integridad mecánica del circuito, así como estimar la vida remanente de los mismos.

De acuerdo a los resultados de estas inspecciones se procede a realizar el mantenimiento necesario para el circuito de tuberías que transportan cloro.



## **9.2. INSPECCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR.**

Especificaciones del intercambiador ver anexo C.

### **9.2.1. PLAN DE INSPECCIÓN.**

1. Analizar la hoja de vida del equipo.
  
2. Establecer requerimientos de inspección (alistamiento)
  - a. Drenaje de líneas.
  - b. Colocar ciegos.
  - c. Colocar tarjetas en válvulas de seguridad.
  
3. Retirar aislamiento térmico si lo hay.
  
4. Apertura del equipo.
  - a. Bajar tapa canal.
  - b. Bajar casco.
  
5. Lavado interno
  - a. Agua a presión.
  - b. Taladro neumático.
  - c. Aire (secado).

6. Se procede a la inspección visual
  - a. Inspección externa
    - i. Evaluar condición de anclaje.
    - ii. Evaluar condición de tortillería bridas y válvulas.
    - iii. Evaluar condición del cuerpo (externa).
    - iv. Evaluar condición de la tubería.
  
7. Si hay fisuras se procede a medir su longitud y profundidad luego se analizan por medio de ultrasonido. Se anotan los resultados y se lleva a cabo los correctivos para eliminar la falla.
  
8. Si no hay fisuras se procede a analizar:
  - a. Condición del Casco.
  - b. Condición de la tapa canal.
  - c. Condición de la placa de tubos.
  - d. Condición de tubos condenados.
  
9. Si hay fisuras se procede a medir su longitud y profundidad luego se analizan por medio de ultrasonido. Se anotan los resultados y se lleva a cabo los correctivos para eliminar la falla.
  
10. Si no hay fisuras se procede con la inspección mediante el ensayo de tintas penetrantes de :

- a. Placa de tubos.
- b. Uniones soldadas.

**NOTA: Se utiliza el ensayo de tintas penetrantes por ser el mas recomendado para líneas de acero inoxidable. Si la línea fuese de acero al carbón el ensayo mas recomendado es el de partículas magnéticas.**

11. Si hay fisuras se procede a medir su longitud y profundidad luego se analizan por medio de ultrasonido. Se anotan los resultados y se lleva a cabo los correctivos para eliminar la falla.
  
12. Si no hay fisuras se procede a una prueba de presión hidrostática en la chaqueta.
  - a. Se colocan los manómetros, líneas, válvulas y acoples en el punto mas alto y en el punto de entrada.  
  
Si el intercambiador es viejo la Presión de prueba es igual 1.5 veces la presión de trabajo. Si el intercambiador es nuevo se la Presión de prueba es 1.5 veces la presión de diseño.
  - b. Llenado con agua.
  - c. Venteo para eliminar gases,
  - d. Presionamiento de la chaqueta.
  - e. Se esperan 15 minutos para iniciar análisis. El análisis dura una 1 hora.

13. Si durante esa hora se mantiene la presión, quiere decir que no hay fugas, se procede al cierre de válvulas sin desacoplar manómetros y se repite la prueba presión hidrostática. Se analiza el resultado, se presenta un informe con sus respectivas recomendaciones correctivas (inmediatas) y preventivas ( programadas ). Se recibe el equipo y se aplica un inspección visual, si se está conforme es el final del plan de inspección, sino se está conforme se mejoran las recomendaciones y se aplica hasta que el equipo quede en buen estado.

14. Si durante esa hora no se mantiene la presión, quiere decir que hay fugas que pueden estar en las bridas, en el cuerpo, en la placa de tubos, en los tubos.

- a. Si la fuga es en las bridas se recomienda apriete o cambio de sello.
- b. Si es en el cuerpo se procede a la reparación.
- c. Si es en el has de tubos se recomienda reexpandir.
- d. Si es en los tubos se recomienda el taponamiento.

15. Después de realizar los correctivos, se repite la prueba de presión hidrostática para verificar si el equipo queda en buen estado.

16. Si el equipo está en buen estado se procede a realizar lo explicado en el ítem 13, si el equipo no está en buen estado se repiten los ítems 14 y 15 hasta que el equipo quede en buen estado.

### **9.2.2. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.**

A la hora de trabajar con intercambiadores de calor se debe tener en cuenta las normas aplicables a estos equipos, las cuales son:

- T.E.M.A.- TUBE EXCHANGERS MANUFACTURER'S ASSOCIATION. OCTAVA EDICION.
- A.P.I. - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE.
- EXXON INTERNATIONAL PRACTICES.
- SHELL DESIGN AND ENGINEERING PRACTICES.

Según las normas de T.E.M.A., la inspección de intercambiadores de calor se debe hacer:

- A intervalos regulares predeterminados o según la experiencia lo indique se debe realizar una inspección de la condición interior y exterior del intercambiador de calor.
- Los intercambiadores susceptibles a ensuciamiento o encrustamiento deben ser limpiados periódicamente.

La dificultad para limpiar aumenta según la magnitud del ensuciamiento; los intervalos entre limpiezas no deben ser muy largos .

Según la A.P.I., el mantenimiento de los intercambiadores de calor se debe basar en la condición (mantenimiento predictivo), ayudándose principalmente del método de **TERMOGRAFIA INFRARROJA** ya que esta es muy útil en el análisis de problemas, da una buena indicación del flujo de calor a través del equipo y da un diagnóstico de fallas internas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de corrosión debe ser visto como un hecho que pone en evidencia el proceso natural de que los metales vuelven a su condición primitiva y que ello conlleva al deterioro del mismo. No obstante es este proceso el que provoca la investigación y el planteamiento de fórmulas que permitan alargar la vida útil de los materiales sometidos a este proceso.

Por medio de esta investigación se confirma que la lucha y control de la corrosión es un arte dentro del mantenimiento y que esta área es bastante amplia, dado el sinnúmero de condiciones a los cuales se encuentran sometidos los metales que forman equipos y herramientas.

El control de la corrosión es de suma importancia para preservar los equipos, tuberías o cualquier otra pieza de metal para evitar pérdidas, ya que no se puede impedir completamente la pérdida de los metales por corrosión. Para trabajar en problemas de corrosión, es necesario saber donde empezar y tener el conocimiento básico para reconocer la corrosión.

¿Cómo se produce?, ¿cómo impedir su severidad?, ¿ qué herramientas son necesarias, técnicas de inspección, variable de diseño que afectan a la misma, selección de materiales y la forma de aplicar la información del problema corrosivo?

Todos los metales y las aleaciones son susceptibles a sufrir el fenómeno de corrosión, y no existe material que lo resista. Los aceros inoxidable no son materiales indestructibles, tampoco inmunes a todos los ataques corrosivos, sin embargo con una selección cuidadosa y adecuada fabricación, la gran mayoría de las condiciones corrosivas pueden ser manejadas por alguno de los integrantes de la familia de los aceros inoxidable.

El empleo de las técnicas de inspección asociado al buen diseño, construcción, operación, y mantenimiento de las tuberías de proceso y equipos en general, son alternativas que ayudan a minimizar los efectos de la corrosión, ya que ésta no puede ser evitada del todo debido a que todos los materiales se corroen en mayor o menor grado por causas inherentes al propio material y a factores ambientales que siempre estarán presentes.



## BIBLIOGRAFÍA

ALEXANDRE, J Maurin / Manual de Anticorrosion / Bilbo España, Ediciones Armó, 1966.

BOTIA FLÓREZ, José Salomón/ Ingeniería de corrosión / Ediciones Bogotá : Instituto Nacional del Acero, 1985.

F.A Champion / Ensayos de Corrosión / Bilbao España, Ediciones Urmo, 1970.

MOLERA SOLA, Pere / Metales Resistentes a la Corrosión / Colección Productiva No. 35, Marcombo Editores, 1990.

ORTEGA MAIGUEZ José Antonio / La Corrosión Industrial / Barcelona España, Marcombo Boixareu Editores, 1990.

<http://www.fastpack.cl>

<http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>

<http://www.corrosion-doctors.org>

# ***ANEXOS***

## ANEXO A. TABLA DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.

{Esta tabla está basada en datos de laboratorio}

\* Recomendado

+Leve ataque (uso con precaución)

x Ataque químico no recomendado

- No ensayado

I Corrosión por picado en varias condiciones

II Ataque en presencia de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

MEDIO QUIMICO	TEMPERATURA	TIPO DE ACERO INOXIDABLE			
		316	302/304	430	410
ACÉTICO (ÁCIDO)					
5-20%	25	*	*	*	*
50%	25	*	*	+	-
80%	25	*	*	*	-
100%	25	*	*	*	*
50%	EBULLICIÓN	*	+	X	-
80%	EBULLICIÓN	*	X	X	-
100%	EBULLICIÓN	*	+	X	-
ACETILENO	25	*	*	*	-
AGUA (clorada)	25	+	X	x	-
Saturada					
AGUA (de mar)	25	*	*	+	X
			I	I	
ALCOHOL (etílico)	25	*	*	*	-
	EBULLICIÓN	*	*	*	-
ALCOHOL (metílico)	25	*	*	*	-
	EBULLICIÓN	*	+	+	-
ALUMINIO (cloruro)					
25%	25	+	X	X	-
Saturado	25	-	X	X	-
AMONIACO (SECO O HÚMEDO)	25-100	*	*	*	-
ARSÉNICO (ácido)	65	*	*	-	-
BARIO (cloruro)					
5%	25	*	*	+	-
Saturado	25	*	*	*	-
Sol. Acuosa	CALIENTE	*	*	-	-

BENZENO	25	*	*	*	*
BROMO	25	+	+	+	-
CALCIO (clorato) Sol. Diluida Sol. Diluda	25 CALIENTE	* *	* *	- -	- -
CALCIO (cloruro) Sol. Diluida Sol. Concentrada	25 25	*   *	*   *	+   +	- -
CARBONO (monóxido)	760 870	* *	* *	* *	* -
CERVEZA	25	*	*	*	-
CLÓRICO (ácido)	25	X	X	X	-
CLORHÍDRICO (ácido)	25	X	X	X	X
CLORHÍDRICO (gas) Seco Húmedo	25 25	+ X	+ X	+ X	- -
COCA-COLA Jarabe puro	25	*	*	*	-
CÍTRICO (ácido) 10% 25% 50% 10% 25% 50%	25 25 25 EBULLICIÓN EBULLICIÓN EBULLICIÓN	* * * * * *	* * * * X X	* * - + - -	X - - + - -
CAFÉ	EBULLICIÓN	*	*	*	-
ETER	25	*	*	*	-
AZUFRE (cloruro)	FRÍO Y SECO	X	X	X	-
FÉRRICO TODAS LAS CONCENTRACIONES	25	*	*	*	*
FLUORHÍDRICO (ácido)	25 CALIENTE	X	X	X	-
GASOLINA	25	*	*	*	*
GELATINA	25	*	*	*	*
GLICERINA	25	*	*	*	*
YODO	25	X	X	X	-
LECHE	FRÍO O CALIENTE	*	*	*	-
ACEITES CRUDOS	FRÍO Y CALIENTE	* II	* II	* II	-
ACEITES VEGETALES Y ANIMALES	FRÍO Y CALIENTE	* II	* II	* II	-
ACEITE COMBUSTIBLE	CALIENTE	*	*	-	-
PARAFINA	FRÍO Y CALIENTE	*	*	*	*
JABONES	25	*	*	*	-

SODIO (cloruro) Todas concentraciones	25	*	*	*	-
JUGO DE FRUTAS	25 *	*	*	*	*
VINAGRE	25	*	*	*	-
	CALIENTE	*	*	*	-
WHISKY		*	*	-	-

**ANEXO B. RECOMENDACIONES POR TIPO PARA COMBATIR  
CORROSION**

CU: Corrosión Uniforme.

CP: Pitting.

CGA: Galvánica.

CGR: En Grietas.

SCC: Stress Corrosión Cracking.

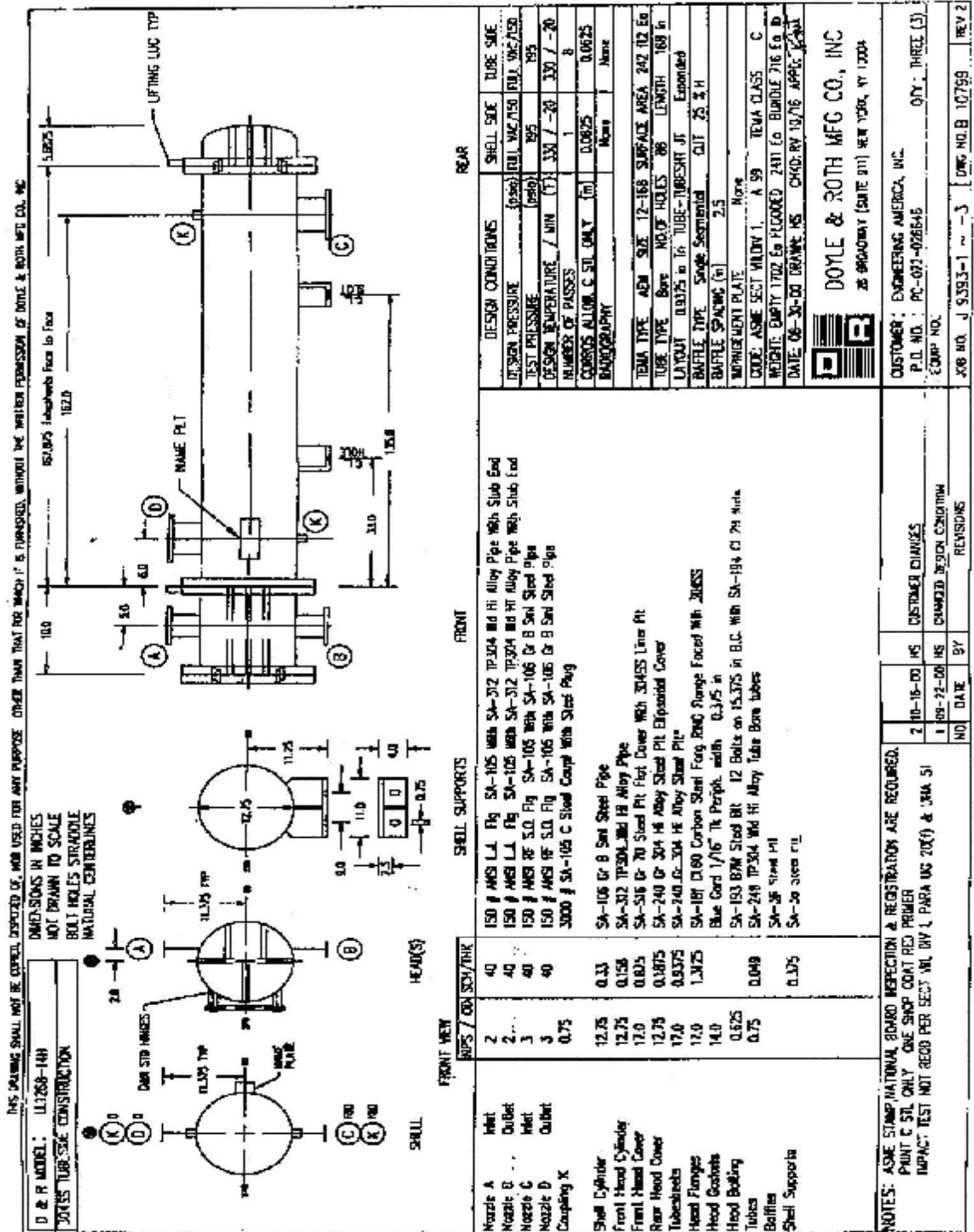
CI: Corrosión Íntergranular.

CE: Corrosión Por Erosión.

RECOMENDACIONES POR TIPO PARA COMBATIR LA CORROSIÓN	CU	CP	CGA	CGR	SCC	CI	CE
Elegir un material resistente al agente corrosivo.	X	X			X		
Eliminar el agente corrosivo o usar inhibidor.	X	X	X	X	X		X
Usar protección catódica.	X	X			X		X
Seleccionar materiales iguales o de similar tendencia a la oxidación.			X				
Aislar un metal del otro.			X				
Alejar metales disímiles en un mismo medio conductor			X				
Evitar uniones con hilos con metales disímiles, usar soldadura.			X				
Aplicar recubrimientos (pinturas no porosas)	X	X	X				X
Evitar acceso de agua y/o aire en la unión de dos metales disímiles.			X				
Mantener los niveles de cloruro, bajos, y evitar ambientes oxidantes.		X					
Evitar diseño que deje fluidos estancados, o ciclos alternados de secado mojado.		X					
Aumentar velocidad fluido		X					
Evitar diseños con grietas				X			
Diseñar equipos para drenaje total, evitando fluidos estancados.				X			
Remover Depósitos regularmente.				X			
Sellar grietas existentes				X			
Usar uniones soldadas, en vez de uniones atornilladas, apernadas o remachadas.				X			
Evitar empaquetaduras porosas.				X			

Remover empaquetadura porosas durante detención por servicio.				X			
Usar aceros y alloys de bajo Carbono						X	
Usar soldaduras de acero y/o alloys de bajo Carbono						X	
Usar aceros estabilizados con titanio, Niobio						X	
Recocer después de soldar.						X	
Minimizar tensiones.					X		
Evitar trazas de elementos inductores de SCC					X		
Minimizar la temperatura de operación.					X		
Usar materiales mas duros							X
Modificar diseño(geometría) para evitar turbulencia y formación de burbujas.							X
Disminuir velocidad de fluidos.							X
Filtrar partículas.							X

ANEXO C. ESPECIFICACIONES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR



THIS DRAWING SHALL NOT BE COPIED, REPRODUCED, OR USED FOR ANY PURPOSE OTHER THAN THAT FOR WHICH IT IS FURNISHED, WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF DOYLE & ROTH MFG CO., INC.

D & R MODEL: L13258-14H  
 DOYLE TUBE SHEET CONSTRUCTION

ALL DIMENSIONS IN INCHES  
 NOT DRAWN TO SCALE  
 BOLT HOLES STRADDLE  
 NATURAL CENTERLINES

FRONT VIEW	SHELL SUPPORTS	FRONT	REAR
NOZZLE A	150 # A516 L4 Flg SA-105 With SA-312 TP-304 Mid Hi Alloy Pipe With Stub End	NOZZLE A	NOZZLE A
NOZZLE B	150 # A516 L4 Flg SA-105 With SA-312 TP-304 Mid Hi Alloy Pipe With Stub End	NOZZLE B	NOZZLE B
NOZZLE C	150 # A516 L4 Flg SA-105 With SA-106 Or B Std Steel Pipe	NOZZLE C	NOZZLE C
NOZZLE D	150 # A516 L4 Flg SA-105 With SA-106 Or B Std Steel Pipe	NOZZLE D	NOZZLE D
COUPLING X	3000 # SA-105 C Steel Coupl With Steel Plug	COUPLING X	COUPLING X
SHELL	SA-106 Or B Std Steel Pipe	SHELL	SHELL
FRONT HEAD CYLINDER	SA-312 TP-304 Mid Hi Alloy Pipe	FRONT HEAD CYLINDER	FRONT HEAD CYLINDER
FRONT HEAD COVER	SA-316 Or 70 Std Steel Plt Flt Cover With 3/16" SS Liner Plt	FRONT HEAD COVER	FRONT HEAD COVER
REAR HEAD COVER	SA-240 Or 304 Hi Alloy Std Steel Plt Elipsoidal Cover	REAR HEAD COVER	REAR HEAD COVER
TUBESHEETS	SA-240 Or 304 Hi Alloy Std Steel Plt	TUBESHEETS	TUBESHEETS
HEAD FLANGES	SA-181 D180 Carbon Steel Forg 250C Flange Faced With 250SS	HEAD FLANGES	HEAD FLANGES
HEAD GASKETS	Blue Cord 1/16" Thk Periph. with 0.125 in	HEAD GASKETS	HEAD GASKETS
HOOD BOLTING	SA-193 B7M Std BK 12 Bolts on 15.375 in B.C. With SA-194 C1 24 nuts	HOOD BOLTING	HOOD BOLTING
TUBES	SA-249 TP-304 Mid Hi Alloy Tube Bare Tubes	TUBES	TUBES
Baffles	SA-26 Std Steel Plt	Baffles	Baffles
Shell Supports	SA-26 Std Steel Plt	Shell Supports	Shell Supports

DESIGN CONDITIONS	SHELL SIZE	TUBE SIZE
DESIGN PRESSURE (psig)	12-168	242-112 Ea
TEST PRESSURE (psig)	195	189 in
DESIGN TEMPERATURE / MIN (°F)	330 / -20	330 / -20
NUMBER OF PASSES	1	8
CORROSION ALLOW. C. STL. ONLY (in)	0.0625	0.0625
BIDDING UNIT	None	None
ITEM TYPE	ADM SIZE	12-168 SURFACE AREA 242-112 Ea
TUBE TYPE	Bore	NO OF HOLES 88
LAYOUT	0.0075 in to TUBE-TUBESHEET JT	EXPANDED
BAFFLE TYPE	Single Segmental	CUT 25 % H
BAFFLE SPACING (in)	2.5	
IMPROVEMENT PLATE	None	
CODE	ASME SECT VIII DIV 1, A 99	TEMA CLASS C
WEIGHTS	EMPTY 1702 Ea PLEADED 2411 Ea BUNDLE 716 Ea D	
DATE	08-30-00	DRAWN BY: CHAD RYAN/10/16 APPR: [Signature]

DOYLE & ROTH MFG CO., INC  
 25 BRADWAY (SUITE 211) NEW YORK, NY 10004

CUSTOMER: ENGINEERING AMERICA, INC. CITY: THREE (3)  
 P.I. NO.: PC-092-026846  
 COMP. NO.:  
 XFB NO. J 53913-1-3 DWG NO. B 10759 REV 2

NOTES: ASME STAMP/NATIONAL BOARD INSPECTION & REGISTRATION ARE REQUIRED.  
 PRINT C STL ONLY ONE SHOP COAT RED PRIMER  
 IMPACT TEST NOT REQD PER SECT VIII DIV I PARA UG 20(f) & 3MA.51

REVISIONS

NO	DATE	BY	REVISIONS
2	10-16-00	MS	CUSTOMER CHANGES
1	09-22-00	MS	CHANGED DESIGN CENTERLINE







**ANEXO F. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN POR PARTICULAS  
MAGNETICAS**

		<b>PARTÍCULAS MAGNÉTICAS REPORTE DE INSPECCIÓN</b>		INFORME N°: FECHA:		
		PROCEDIMIENTO N°: REVISIÓN N°:	FECHA:	OT: POR:		
CLIENTE:		PROYECTO:				
LUGAR DE INSPECCIÓN:		CIUDAD:				
ESPECIFICACIÓN (NORMA) :		DETALLE:				
EQUIPO DE INSPECCIÓN:		PLANO N°:				
ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL:		RANGO DE ESPESORES:				
ESTADO DE LA SUPERFICIE:      TEMPERATURA :		ACABADO DE LA SUPERFICIE :				
PROCESO DE SOLDADURA:		TIPO DE JUNTA:				
TRATAMIENTO TÉRMICO :		DIÁMETRO O LONGITUD :				
LONGITUD DE INSPECCIÓN :		SUPERFICIE DE INSPECCIÓN :				
PARTÍCULA MAGNÉTICA TIPO :		SERIE N°/ LOTE:				
MÉTODO DE LIMPIEZA INICIAL :		LIMPIADOR TIPO : CLEANER-ESTOPA.				
MÉTODO DE MAGNETIZACIÓN : YOKE (YUGO MAGNÉTICO)		REVELADOR TIPO : NA				
CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN : ALTERNA		INTENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO: 7 AMP				
LIMPIEZA FINAL:		SENSIBILIDAD DE REF: BLOQUE DE REF.				
IDENTIFICACIÓN DE SOLDADURAS	DESDE SUP. INSPCC.	DEFECTOS (mm)		RESULTADOS		
		TIPO DE INDICACIÓN	LONGITUD INDICACIÓN	APROBADO	RECHAZADO	NOTAS
<b>SOLDADURAS A TOPE DE</b>						
NOMBRE DEL INSPECTOR		FIRMA	FIRMA DEL CLIENTE	FIRMA DEL AUDITOR		

## ANEXO G. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS

		INSPECCIÓN EXTERNA PARA SISTEMAS DE TUBERÍAS. REPORTE DE INSPECCIÓN				FORMA N°: FECHA:	
		PROCEDIMIENTO N°: REVISIÓN N°:		FECHA:		TAD:	
CLIENTE:				PROYECTO:			
LUGAR DE INSPECCIÓN:				CANTÓN:			
ESPECIFICACIÓN (NORMA): ARI 100				DETALLE:			
EQUIPO DE INSPECCIÓN:				PLANO N°: O DIMENSIONES: CALIBRE:			
ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL:				DIMENSIONES:			
AISLAMIENTO:		SI		NO		ESPECIES:	
GRUPO DE INSPECCIÓN:				CIRCUNSTANCIAS:			
ITEM	PARÁMETROS DE CONTROL	CONDICIÓN ACTUAL DE CUMPLIMIENTO		RECOMENDACIÓN CORRECTIVA INMEDIATA*		OBSERVACIONES	
		ACEPTABLE	NO ACEPT.	S	N		
<b>1. SOPORTES</b>							
1.1	Condición de la intemperie concreto - soporte						
1.2	Condición de los tornillos, pernos de anclaje.						
1.3	Condición de la placa de anclaje, resaca o placa base.						
1.4	Condición de soporte con OBSERVACIONES tipo de soporte						
1.5	Condición de pintura del soporte						
1.6	Condición de corrosión del soporte						
1.7	Condición de alineación del grupo o soporte						
1.8	Condición de las soldaduras						
1.9	Condición de protección a erosión - resaca.						
1.10	Condición Tornillo de retención - 3/8".						
1.11	Condición de la pintura soldadura - soporte con tubería.						
1.12	Condición de la corrosión en el base anclaje a los soportes.						
<b>2. TUBERÍA</b>							
2.1	Condición de la tubería entre soportes						
2.2	Condición de composición de la tubería entre soportes						
2.3	Condición de curvatura de los accesorios						
2.4	Condición de la pintura de tubería entre soportes						
2.5	Condición de la tubería por erosión.						
2.6	Condición de la tubería por "S" de 1/4" de 1/2" de tubería						
2.7	Condición porches de stress corrosión cracking.						
2.8	Condición de cualquier elemento de la tubería						
2.9	Condición de vibración de la tubería.						
2.10	Condición de vibración por mal ubicado soporte						
2.11	Medida de espesor de la tubería de la tubería por rozamiento contra el apoyo						
2.12	Alineación de tubería - restricción de movimiento						
2.13	Condición de juntas por juntas de expansión.						
2.14	Condición de la tubería por corrosión oculta.						
<b>3. AISLAMIENTO</b>							
3.1	Condición de todo el aislamiento de la tubería						
3.2	Condición de todo el aislamiento en accesorios.						
3.3	Medida del aislamiento en tubería						
3.4	Condición de aislamiento por deterioro por solvente						
3.5	Presencia de fugas en el aislamiento de accesorios						
3.6	Condición de sellos de aislamiento						
3.7	Condición de pérdida de aislamiento						
3.8	Condición de juntas de aislamiento - tol						
<b>4. FUGAS</b>							
4.1	Producto de vapor de agua en tubería abierta.						
4.2	Producto de vapor de agua en conexiones						
4.3	Producto de vapor en conexión con equipo (bombeo de presión)						
CLASE POR RIESGO DE SERVICIO: C1 ALTO RIESGO POR SERVICIO DE LA TUBERÍA, C2 MODERADO RIESGO POR SERVICIO Y C3 BAJO RIESGO POR SERVICIO.							
OBSERVACIONES GENERALES:							
NOMBRE DEL INSPECTOR		FIRMA		FIRMA DEL CLIENTE		FIRMA DEL AUDITOR	

**ANEXO H. EJEMPLO DE FORMATO DE INSPECCIÓN POR PARTICULAS  
MAGNETICA**

		<b>LÍQUIDOS PENETRANTES REPORTE DE INSPECCIÓN</b>		INFORME N°:
				FECHA:
		PROCEDIMIENTO N°:	FECHA	POR:
		REVISIÓN N°:		
CLIENTE:		PROYECTO:		
LUGAR DE INSPECCIÓN:		CIUDAD:		
ESPECIFICACIÓN (NORMA):		DETALLE:		
EQUIPO DE INSPECCIÓN:		PLANO N°:		
ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL:		RANGO DE ESPESORES:		
ESTADO DE LA SUPERFICIE:		TEMPERATURA:	ACABADO DE LA SUPERFICIE:	
PROCESO DE SOLDADURA:		TIPO DE JUNTA:		
TRATAMIENTO TÉRMICO:		DIÁMETRO O LONGITUD:		
LONGITUD DE INSPECCIÓN:		SUPERFICIE DE INSPECCIÓN:		
LÍQUIDOS PENETRANTES TIPO:		LIMPIADOR TIPO:		
MÉTODO DE LIMPIEZA INICIAL:		PENETRANTE TIPO:		
LIMPIEZA EXCESO LIQUIDO PENETRANTE:		REVELADOR TIPO:		
TIEMPO DE PERMANENCIA DEL PENETRANTE:		TIEMPO DE PERMANENCIA DEL REVELADOR:		
LIMPIEZA FINAL:		SENSIBILIDAD DE REF:		
<b>OBSERVACIONES:</b>				
NOMBRE DEL INSPECTOR		FIRMA	FIRMA DEL CLIENTE	FIRMA DEL AUDITOR