**APENDICES**

#### APENDICE A

#### EFECTIVIDAD DE LAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN PARA VARIOS TIPOS DE DAÑOS

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Técnica de Inspección | **Reducción de espesor** | **Fisuras en superficie** | **Fisuras subsuperficiales** | **Formación de microfisuras** | **Cambios metalográficos** | **Cambios dimensionales** | **Ampolladuras** |
| Inspección Visual | 1 – 3 | 2 – 3 | X | X | X | 1 – 3 | 1 – 3 |
| Ondas longitudinales de ultrasonido | 1 – 3 | 3 – X | 3 – X | 2 – 3 | X | X | 1 – 2 |
| Ondas superficiales de ultrasonido | X | 1 – 2 | 1 – 2 | 2 – 3 | X | X | X |
| Partículas magnéticas fluorescentes | X | 1 – 2 | 3 – X | X | X | X | X |
| Tintas penetrantes | X | 1 – 3 | X | X | X | X | X |
| Emisión acústica | X | 1 – 3 | 1 – 3 | 3 – X | X | X | 3 – X |
| Corrientes de Eddy | 1 – 2 | 1 – 2 | 1 – 2 | 3 – X | X | X | X |
| Detección de fugas | 1 – 2 | X | X | X | X | X | X |
| Radiografía | 1 – 3 | 3 – X | 3 – X | X | X | 1 – 2 | X |
| Medición de dimensiones | 1 – 3 | X | X | X | X | 1 – 2 | X |
| Metalografía | x | 2 – 3 | 2 – 3 | 2 – 3 | 1 – 2 | X | X |

1= Muy efectivo 2 = Efectividad normal 3 = Posiblemente efectivo X = No se usa normalmente

#### APÉNDICE B

#### INSPECCIONES RECOMENDADAS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LOS MECANISMOS DE DETERIORO DE ACUERDO A LA NORMA API 573

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Mecanismo de Deterioro** | **Manifestación** | **Técnica de Inspección** | **Criterio de Aceptación Típico** | **Métodos de Prevención** |
| Creep/Ruptura por Tensión | Protuberancia en tubos | Inspección Visual  Medición dimensional | Máximo 1% - 5% de crecimiento | Reducir la temperatura de metal del tubo y / o tensiones de operación |
| Creep | Protuberancia en tubos | Metalografía en sitio | No hay criterio definido, evalúe la cantidad y severidad del daño | Reducir la temperatura de metal del tubo y / o tensiones de operación |
| Creep | Pandeo en tubos | Medición dimensional de la cantidad pandeada | Máximo 5 diámetros de tubo | Revisar la temperatura de operación del metal, el sistema de soporte de los tubos |
| Transformación metalúrgica de materiales ferríticos | Alta dureza | Pruebas de dureza | Máximo 220 BHN para aceros al carbono y 280 BHN para Cr - Mo | Revisar la operación de los quemadores e indicadores de proceso |
| Adelgazamiento, oxidación externa | Perdida general del metal | Medición ultrasónica | Espesor mayor que el mínimo espesor requerido para ser cambiado | Reducir la temperatura de operación del tubo, cambiar el material por otro más resistente a la oxidación |
| Adelgazamiento, erosión | Perdida localizada de metal | Medición ultrasónica  Pruebas radiográficas | Espesor mayor que el mínimo espesor requerido para ser cambiado | Revisar las tasas de fluido, revisar la composición del fluido, considerar cambiar el material. |

#### APÉNDICE C

#### DATOS DE LA CALDERA ACUATUBULAR YB-7005 EMPLEADOS EN EL ANALISIS CUANTITATIVO

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Zona** | **Tiempo Servicio (yr)** | **Diámetro Diseño (in)** | **Espesor Diseño (in)** | **Espesor Instalado[[1]](#footnote-2) (in)** | **Espesor Medido (in)** | **Tasa de Corrosión**  **(in/yr)** | **Temp. Diseño**  **(°F)** | **Temp. Operación (°F)** | **Presión Diseño (PSI)** | **Presión Operación (PSI)** | **Material de Construcción** |
| **TUBOS** | | | | | | | | | | | |
| Banco generador | 5,9 | 2,5 | 0,125 | 0,144 | 0,138 | 0,001017 | 700 | 550 | 770 | 592 | SA-192 |
| Pared lateral Izquierda | 5,9 | 2,5 | 0,165 | 0,190 | 0,187 | 0,000508 | 700 | 600 | 770 | 592 | SA-192 |
| Pared lateral derecha | 5,9 | 2,5 | 0,165 | 0,190 | 0,186 | 0,000678 | 700 | 600 | 770 | 592 | SA-192 |
| Pared posterior | 5,9 | 2,5 | 0,165 | 0,190 | 0,184 | 0,001017 | 700 | 500 | 770 | 592 | SA-192 |
| Techo del hogar | 5,9 | 2,5 | 0,180 | 0,207 | 0,194 | 0,002203 | 700 | 600 | 770 | 592 | SA-192 |
| Pared frontal A | 5,9 | 2,5 | 0,180 | 0,207 | 0,186 | 0,003559 | 700 | 600 | 770 | 592 | SA-192 |
| Pared frontal B[[2]](#footnote-3) | 5,9 | 2,5 | 0,220 | 0,253 | 0,237 | 0,002712 | 700 | 600 | 770 | 592 | SA-192 |
| Piso | 5,9 | 2,5 | 0,180 | 0,207 | 0,197 | 0,001695 | 700 | 450 | 770 | 592 | SA-192 |
| Pantalla | 5,9 | 2,5 | 0,165 | 0,190 | 0,172 | 0,003051 | 700 | 650 | 770 | 592 | SA-192 |
| Sobrecalentador | 5,9 | 2,5 | 0,220 | 0,253 | 0,239 | 0,002373 | 752 | 700 | 770 | 592 | SA-213-T11 |
| Alimentadores | 5,9 | 3,0 | 0,180 | 0,207 | 0,201 | 0,001000 | 650 | 450 | 770 | 592 | SA-192 |
| Retorno | 5,9 | 4,0 | 0,203 | 0,233 | 0,226 | 0,001186 | 650 | 500 | 770 | 592 | SA-192 |
| Vapor Saturado | 5,9 | 10,75 | 0,593 | 0,682 | 0,676 | 0,001000 | 650 | 500 | 770 | 592 | SA-106-B |
| Atemperador | 5,9 | 10,75 | 0,593 | 0,682 | 0,676 | 0,001000 | 684 | 450 | 770 | 592 | SA-106-B |
| Cabezales sobrecalentador | 5,9 | 12,75 | 0,875 | 1,000 | 0,994 | 0,001017 | 752 | 600 | 770 | 592 | SA-106-B |
| Cabezales pared lateral | 5,9 | 12,75 | 0,875 | 1,000 | 0,990 | 0,001695 | 650 | 500 | 770 | 592 | SA-192 |
| **DOMOS** | | | | | | | | | | | |
| Domo de vapor | 5,9 | 60,75 | 1,75 | 2,0125 | 2,0066 | 0,001 | 700 | 600 | 770 | 592 | SA-516-70 |
| Domo de agua | 5,9 | 41,5 | 2,25 | 2,5875 | 2,5816 | 0,001 | 700 | 600 | 770 | 592 | SA-516-70 |
| **OTROS ELEMENTOS** | | | | | | | | | | | |
| Ducto de gases[[3]](#footnote-4) | 5,9 | 79,58 | 0,25 | 0,275 | 0,259 | 0,002712 | - | 600 | - | - | ASTM A36 |
| Ducto de aire3 | 5,9 | 54 | 0,25 | 0,275 | 0,261 | 0,002373 | - | 500 | - | - | ASTM A36 |

#### APÉNDICE D

#### SUBFACTOR DE MÓDULO TÉCNICO POR REDUCCIÓN DE ESPESOR

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Numero de**  **Inspecciones** | | **1** | | | | **2** | | | | **3** | | | | **4** | | | | **5** | | | |
| **EFECTIVIDAD** | | | | **EFECTIVIDAD** | | | | **EFECTIVIDAD** | | | | **EFECTIVIDAD** | | | | **EFECTIVIDAD** | | | |
| **ar/t** | **NInguna** | **M** | **R** | **N** | **A** | **M** | **R** | **N** | **A** | **M** | **R** | **N** | **A** | **M** | **R** | **N** | **A** | **M** | **R** | **N** | **A** |
| **0.02** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **0.04** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **0.06** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **0.08** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **0.10** | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **0.12** | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| **0.14** | 20 | 17 | 10 | 6 | 1 | 13 | 6 | 1 | 1 | 10 | 3 | 1 | 1 | 7 | 2 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| **0.16** | 90 | 70 | 50 | 20 | 3 | 50 | 20 | 4 | 1 | 40 | 10 | 1 | 1 | 30 | 5 | 1 | 1 | 20 | 2 | 1 | 1 |
| **0.18** | 250 | 200 | 130 | 70 | 7 | 170 | 70 | 10 | 1 | 130 | 35 | 3 | 1 | 100 | 15 | 1 | 1 | 70 | 7 | 1 | 1 |
| **0.20** | 400 | 300 | 210 | 110 | 15 | 290 | 120 | 20 | 1 | 240 | 60 | 5 | 1 | 180 | 20 | 2 | 1 | 120 | 10 | 1 | 1 |
| **0.25** | 520 | 450 | 290 | 150 | 20 | 350 | 170 | 30 | 2 | 260 | 80 | 6 | 1 | 200 | 30 | 2 | 1 | 150 | 15 | 2 | 1 |
| **0.30** | 650 | 550 | 400 | 200 | 30 | 400 | 200 | 40 | 4 | 320 | 110 | 9 | 2 | 240 | 50 | 4 | 2 | 180 | 25 | 3 | 2 |
| **0.35** | 750 | 650 | 550 | 300 | 80 | 600 | 300 | 80 | 10 | 540 | 150 | 20 | 5 | 440 | 90 | 10 | 4 | 350 | 70 | 6 | 4 |
| **0.40** | 900 | 800 | 700 | 400 | 130 | 700 | 400 | 120 | 30 | 600 | 200 | 50 | 10 | 500 | 140 | 20 | 8 | 400 | 110 | 10 | 8 |
| **0.45** | 1050 | 900 | 810 | 500 | 200 | 800 | 500 | 160 | 40 | 700 | 270 | 60 | 20 | 600 | 200 | 30 | 15 | 500 | 160 | 20 | 15 |
| **0.50** | 1200 | 1100 | 970 | 600 | 270 | 1000 | 600 | 200 | 60 | 900 | 360 | 80 | 40 | 800 | 270 | 50 | 40 | 700 | 210 | 40 | 40 |

M: Mala R: Regular N: Normal A: Alta

**Instrucciones:**

1. Identifique la columna con el valor calculado de ar/t o el próximo alto valor. Puede usarse interpolación entre filas.
2. Determine el subfactor con base a la columna apropiada para el número de inspecciones o la más alta efectividad de inspeccion.

#### APÉNDICE E

#### SUBFACTOR DE MÓDULO TÉCNICO POR AGRIETAMIENTO CAUSTICO

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **N° de Inspecciones** | | **1** | | | | **2** | | | | **3** | | | | **4** | | | | **5** | | | | **6** | | | |
| **Efectividad de Inspección** | | | | **Efectividad de Inspección** | | | | **Efectividad de Inspección** | | | | **Efectividad de Inspección** | | | | **Efectividad de Inspección** | | | | **Efectividad de Inspección** | | | |
| Máximo índice de severidad | No Inspección | Mala | Regular | Normal | Alta | Mala | Regular | Normal | Alta | Mala | Regular | Normal | Alta | Mala | Regular | Normal | Alta | Mala | Regular | Normal | Alta | Mala | Regular | Normal | Alta |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 10 | 8 | 3 | 1 | 1 | 6 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 50 | 50 | 40 | 17 | 5 | 3 | 30 | 10 | 2 | 1 | 20 | 5 | 1 | 1 | 10 | 2 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 100 | 100 | 80 | 33 | 10 | 5 | 60 | 20 | 4 | 1 | 40 | 10 | 2 | 1 | 20 | 5 | 1 | 1 | 10 | 2 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| 500 | 500 | 400 | 170 | 50 | 25 | 300 | 100 | 20 | 5 | 200 | 50 | 8 | 1 | 100 | 25 | 2 | 1 | 50 | 10 | 1 | 1 | 25 | 5 | 1 | 1 |
| 1000 | 1000 | 800 | 330 | 100 | 50 | 600 | 200 | 40 | 10 | 400 | 100 | 16 | 2 | 200 | 50 | 5 | 1 | 100 | 25 | 2 | 1 | 50 | 10 | 1 | 1 |
| 5000 | 5000 | 4000 | 1670 | 500 | 250 | 3000 | 1000 | 250 | 50 | 2000 | 500 | 80 | 10 | 1000 | 250 | 25 | 2 | 500 | 125 | 5 | 1 | 250 | 50 | 2 | 1 |

#### SUBFACTOR DE MÓDULO TÉCNICO AJUSTADO PARA ATAQUE POR HIDROGENO

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | **Primera Inspección**  **Efectividad** | | | **Segunda Inspección**  **Efectividad** | | |
| **Índice de Severidad** | **No Inspección** | **Mala** | **Regular** | **Normal** | **Mala** | **Regular** | **Normal** |
| Daño Observado | - | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Alta Susceptibilidad | 2000 | 1800 | 1200 | 800 | 1600 | 800 | 400 |
| Media Susceptibilidad | 200 | 1800 | 1200 | 80 | 160 | 80 | 40 |
| Baja Susceptibilidad | 20 | 18 | 12 | 8 | 16 | 8 | 4 |
| No Susceptible | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

#### APÉNDICE F

#### SUBFACTOR DE MÓDULO TÉCNICO PARA FRACTURAS POR FRAGILIZACION

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **NO PWHT** | | **Espesor (pulgadas)** | | | | | | | | |
|  |  | **0.25** | **0.5** | **1.0** | **1.5** | **2.0** | **2.5** | **3.0** | **3.5** | **4.0** |
| **T-Tref** | **100** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0.9 | 1.1 | 1.2 |
|  | **80** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.8 | 1.1 | 2 | 2 | 4 | 6 |
|  | **60** | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 2 | 4 | 9 | 19 | 36 | 60 |
|  | **40** | 0.0 | 0.7 | 2 | 9 | 29 | 69 | 133 | 224 | 338 |
|  | **20** | 0.1 | 1.3 | 10 | 49 | 143 | 296 | 500 | 741 | 1008 |
|  | **0** | 0.9 | 3 | 39 | 175 | 424 | 759 | 1142 | 1545 | 1950 |
|  | **-20** | 1.2 | 7 | 109 | 405 | 850 | 1366 | 1897 | 2415 | 2903 |
|  | **-40** | 2 | 16 | 220 | 697 | 1317 | 1969 | 2596 | 3176 | 3703 |
|  | **-60** | 2 | 30 | 350 | 988 | 1740 | 2479 | 3160 | 3769 | 4310 |
|  | **-80** | 3 | 46 | 474 | 1239 | 2080 | 2873 | 3581 | 4203 | 4746 |
|  | **-100** | 4 | 61 | 579 | 1436 | 2336 | 3160 | 3883 | 4509 | 5000 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **PWHT** | | **Espesor (pulgadas)** | | | | | | | | |
|  |  | **0.25** | **0.5** | **1.0** | **1.5** | **2.0** | **2.5** | **3.0** | **3.5** | **4.0** |
| **T-Tref** | **100** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
|  | **80** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
|  | **60** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.9 | 1.1 | 1.3 |
|  | **40** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 1.1 | 1.3 | 2 | 3 | 4 |
|  | **20** | 0.0 | 0.0 | 0.6 | 1.2 | 2 | 4 | 7 | 13 | 23 |
|  | **0** | 0.0 | 0.0 | 1.1 | 2 | 6 | 14 | 29 | 53 | 88 |
|  | **-20** | 0.0 | 0.4 | 2 | 5 | 17 | 41 | 83 | 144 | 224 |
|  | **-40** | 0.0 | 0.9 | 3 | 12 | 38 | 90 | 171 | 281 | 416 |
|  | **-60** | 0.0 | 1.1 | 5 | 22 | 68 | 153 | 277 | 436 | 623 |
|  | **-80** | 0.0 | 1.2 | 7 | 34 | 102 | 219 | 382 | 582 | 810 |
|  | **-100** | 0.0 | 1.3 | 9 | 46 | 133 | 277 | 472 | 704 | 962 |

#### APÉNDICE G

#### PARAMETROS LARSON-MILLER PARA LOS TUBOS DE LA CALDERA YB-7005 (ADAPTADO DE API RP 530)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **MATERIALES** |  |  |  |  |  | **Constante**  **C** |
| **Ao** | **A1** | **A2** | **A3** | **A4** |
| Acero de bajo Carbono  A 161  A192 | 3.98044E+01 | -1.55223E-01 | 0.000000E+00 | -2.52453E+00 | 0.000000E+00 | 20 |
| 1 ¼ Cr – ½ Mo  A 213 T11  A 355 P11  A 200 T11 | 4.26001E+01 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | -2.62249E+00 | 0.000000E+00 | 20 |

Notas:

1. La lista completa para todos los materiales esta disponible en API RP 530 Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries.
2. Las unidades para las ecuaciones en la tabla son como sigue: σ está en Ksi.
3. El Parámetro Larson-Miller, se calcula con la ecuación:



1. El espesor instalado corresponde a un 15% mas que el espesor de diseño. [↑](#footnote-ref-2)
2. Estos tubos rodean a los quemadores, por ello tienen un espesor mayor que los otros que conforman la pared frontal. [↑](#footnote-ref-3)
3. Para el análisis cuantitativo se empleo el diámetro equivalente debido a que los ductos son cuadrados, De = (2a\*b)/(a+b) [↑](#footnote-ref-4)