



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la condición operativa en la Torre de Absorción C-03 de una planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica para elaborar la propuesta en relación a su componente estructural.

González N. José M.  
Hernández B. Ramón E.

Naguanagua, 02 de Mayo de 2011.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la condición operativa en la Torre de Absorción C-03 de una planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica para elaborar la propuesta en relación a su componente estructural.

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor académico:**  
Ing. Luis Sidorovas.

**Autores:**  
González N. José M.  
Hernández B. Ramón E.

Naguanagua, 02 de Mayo de 2011.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la condición operativa en la Torre de Absorción C-03 de una planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica para elaborar la propuesta en relación a su componente estructural.

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

González N. José M.  
Hernández B. Ramón E.

Naguanagua, 02 de Mayo de 2011.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CONSTANCIA

Por medio de la presente se hace constar que la monografía que contiene capítulo I, II y III de tema de trabajo especial de grado titulado **“Evaluación de la condición operativa en la Torre de Absorción C-03 de una planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica para elaborar la propuesta en relación a su componente estructural.”** que es realizada por los bachilleres González José Miguel y Hernández Ramón. Portadores de las Cédulas de Identidad 18.180.204 y 18.857.099 respectivamente: fue recibida y corregida por mi persona Luis Sidorovas, tutor de dichos alumnos.

Sin más a que hacer referencia:

Atentamente:

---

Ing. Luis Sidorovas

Naguanagua, 02 de Mayo de 2011.

# *Agradecimientos*

---

Primordialmente nuestro agradecimiento es para DIOS por ser nuestro sustento y ayuda diaria, así como también agradecemos a nuestra Alma Mater, la UNIVERSIDAD DE CARABOBO, que a través de sus profesores nos brindó la oportunidad de formar nuestros conocimientos, específicamente en la escuela de Ingeniería Mecánica. A nuestro tutor, el Profesor Luis Sidorovas, por sus consejos, guiaturas y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación. De igual manera agradezco al Complejo Petroquímico Morón por permitirnos en todo momento realizar este trabajo de grado dentro de sus instalaciones y brindarnos la información necesaria para la realización de éste; así como también, agradecemos al personal de la empresa por toda su orientación y consejos durante el período tiempo que laboramos en las instalaciones.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“Evaluación de la condición operativa en la Torre de Absorción C-03 de una planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica para elaborar la propuesta en relación a su componente estructural”**, presentada por los bachilleres: **José Miguel González Noguera**, y **Ramón E. Hernández Blanco**, portadores de la Cédula de Identidad N<sup>o</sup>: **18.180.204**, y **18.857.099**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

---

*Prof. Luis Sidorovas  
Presidente del jurado*

---

*Prof. Lucia Martino  
Miembro del jurado*

---

*Prof. Jorge Romero  
Miembro del jurado*

En Naguanagua a los 27 días del mes de Mayo de 2011.

# *RESUMEN*

---

El siguiente trabajo especial de grado tiene como objetivo Evaluar la condición operativa de la Torre de Absorción C-03 de la planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica para elaborar la propuesta en relación a su componente estructural. Para esto se realizó una investigación documental, ensayos no destructivos, levantamiento de elemento de estudio en software y así conocer la condición actual en la torre, y mediante diferentes métodos constatar la propuesta de solución más adecuada, que pueda garantizar la condición operativa del equipo hasta el 2014 de manera segura.

# *Índice de figuras*

---

---

2.1 Curva de la bañera.	11
2.2 Termografías.	29
2.3 Molécula de ácido sulfúrico.	34
2.4 Diagrama del proceso de cámaras de plomo.	38
2.5 Diagrama del proceso de contacto.	39
3.1 Proceso metodológico del estudio.	42
4.1 Instalación 218.	49
4.2 Parte superior de la torre C-03.	50
4.3 Advertencias.	50
4.4 Vista de la parte posterior de la torre C-03.	51
4.5 Instrumentos de medición.	51
4.6 Vista frontal del faldón.	52
4.7 Vista lateral del faldón.	52
4.8 Sistema de anclajes.	53
4.9 Torre de absorción C-03 (b) segundo y tercer anillo sur oeste.	54
4.10 Imagen de la torre de absorción C-03 en pared cilíndrica lado noroeste, entre segundo y tercer anillo.	55
4.11 Imagen de la torre de absorción C-03 muestra punto caliente	55

	en pared lado noreste, a la altura del segundo anillo y cercano a la boquilla de 12”.	
4.12	Imagen de la torre de absorción C-03 leve fuga de ácido en de forma descendente presente en la pared cilíndrica lado sureste.	56
4.13	Imagen de la torre de absorción C-03 ubicada en la pared cilíndrica lado noreste.	56
4.14	Imagen de la torre de absorción C-03 incremento térmico que se presenta de forma descendente ubicado en la pared cilíndrica lado Noroeste.	57
4.15	Imagen de la torre de absorción C-03 incremento térmico que se presenta de forma puntual ubicado en la pared cilíndrica lado oeste específicamente en el segundo anillo.	57
4.16	Imagen de la torre de absorción C-03 incremento de irradiación térmica adyacente a una zona reparada anteriormente.	58
4.17	Imagen de la torre de absorción C-03 muestra punto caliente en periferia de la boquilla N6.	58
4.18	Imagen de la torre de absorción C-03 muestra distribución térmica en pared cilíndrica de la torre, lado sureste, entre segundo y tercer anillo.	59
4.19	imagen de la torre de absorción C-03 muestra punto caliente en pared lado sur, a la altura del segundo anillo.	59
4.20	Imagen de la torre de absorción C-03 muestra punto caliente en periferia de la boquilla de 12”.	60
4.21	Imagen de la torre de absorción C-03 que muestra incremento de irradiación en periferia de la boquilla de 12” (N7), de retorno del medidor de concentración, ubicado en lado sur.	60
4.22	Imagen de la torre de absorción C-03 que muestra punto caliente en periferia de la boquilla de 12” (N5), de entrada de ácido a la torre, lado sureste.	61

4.23 imagen de la torre de absorción C-03 muestra incremento térmico en forma de cascada encontrado en el cuerpo cilíndrico lado Suroeste.	61
4.24 Imagen de la torre de absorción C-03 muestra incremento térmico en forma horizontal en el cuerpo cilíndrico lado sureste de la torre.	62
4.25 Imagen de la torre de absorción C-03 muestra incremento térmico encontrado en la adyacencia lado Sureste de la boquilla inferior en la pared cilíndrica lado Sur.	62
4.26 Imagen de la torre de absorción C-03 muestra incremento térmico en forma vertical descendiente ubicado en la pared cilíndrica lado este parte superior.	63
4.27 Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra incremento térmico en forma vertical descendiente ubicado en la pared cilíndrica lado este, dicho incremento se extiende hasta la parte inferior.	63
4.28 Imagen de la torre de absorción C-03 muestra incremento de irradiación térmica encontrado en la pared cilíndrica lado oeste.	64
4.29 Imagen torre absorción C-03 de medición de espesores mostrando valores obtenidos.	68
4.30 Imagen torre absorción C-03 de medición de espesores mostrando valores obtenidos ubicados en la cúpula superior.	69
4.31 Espesor de capa protectora obtenida en el plano	72
4.32 Nivel de ácido en el tanque.	73
4.33 Perímetro Zecor.	74
4.34 Perímetro acero al carbono.	77
4.35 Área de un casquete esférico.	77
4.36 Vista de los arcos y paredes de ladrillos antiácidos	79
4.37 Levantamiento 3D, torre de absorción C-03.	86

4.38 Alternativa de solución N°1.	90
4.39 Alternativa de solución N°2.	90
4.40 Alternativa de solución N°3.	91
4.41 Refuerzos sugeridos al faldón.	95
4.42 Faldón.	96
4.43 Mallado faldón.	99
4.44 Tensión normal de X sin refuerzo.	100
4.45 Tensión normal de X con refuerzo.	100
4.46 Tensión normal de Y sin refuerzo.	101
4.47 Tensión normal de Y con refuerzo.	101
4.48 Tensión normal de Z sin refuerzo.	102
4.49 Tensión normal de Z con refuerzo.	102
4.50 Tensión de Von Mises sin refuerzo.	103
4.51 Tensión de Von Mises con refuerzo.	103
4.52 Desplazamiento en X sin refuerzo.	104
4.53 Desplazamiento en X con refuerzo.	104
4.54 Desplazamiento en Y sin refuerzo.	105
4.55 Desplazamiento en Y con refuerzo.	105
4.56 Desplazamiento en Z sin refuerzo.	106
4.57 Desplazamiento en Z con refuerzo.	106
4.58 Desplazamiento resultante sin refuerzo.	107
4.59 Desplazamiento resultante con refuerzo.	107
4.60 Factor de seguridad sin refuerzo.	108
4.61 Factor de seguridad con refuerzo.	108
4.62 Faldón sin refuerzo, espesor 11 mm.	110
4.63 Faldón sin refuerzo, espesor 9 mm.	110
4.64 Faldón sin refuerzo, espesor 7 mm.	111
4.65 Faldón sin refuerzo, espesor 5 mm.	111

# *Índice general*

---

<b>Índice general</b>	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>V</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>CAPITULO I.</b>	
<b>Problema de investigación.</b>	
1.1 Introducción	1
1.2 Situación problemática	1
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Justificación	3
1.5 Alcance	4
1.6 Limitaciones	5
1.7 Antecedentes	5

## **CAPITULO II**

### **Marco Teórico.**

2.1	Introducción	9
2.2	Gestión del mantenimiento de activos físicos	9
2.2.1	Ciclo de vida de un activo físico	10
2.2.2	Tipos de mantenimiento	11
2.2.2.1	Mantenimiento correctivo	11
2.2.2.2	Mantenimiento preventivo	12
2.2.2.3	Mantenimiento predictivo	12
2.2.2.4	Mantenimiento de mejora	12
2.2.2.5	Mantenimiento de oportunidad	13
2.3	Evaluación de la condición operativa del componente estructural de un activo	13
2.3.1	Materiales involucrados	13
2.3.1.1	Clasificación de los aceros	14
2.3.2	Tipos de fallas en el material	16
2.3.2.1	Corrosión	16
2.3.2.1.1	Naturaleza de la corrosión	16
2.3.2.1.2	Tipos de corrosión	18
2.3.2.1.3	Efecto de la temperatura	18
2.3.2.1.4	Efecto del pH	18
2.3.2.1.5	Corrosión por agua de mar	19
2.3.2.1.6	Corrosión atmosférica	19
2.3.2.2	Fatiga	20
2.3.2.2.1	Fatiga con corrosión	22
2.3.2.2.2	Determinación de vida remanente	23
2.3.3	Ensayos para determinar fallas en el material	24
2.3.3.1	Ensayos para la determinación de fallas	25
2.3.3.1.1	Medición de espesores	25
2.3.3.1.2	Líquidos penetrantes	26

2.3.3.1.3 Termografías infrarrojas	28
2.3.3.1.4 Partículas magnéticas	29
2.3.3.1.5 Gammagrafía industrial	30
2.3.4 Proceso de soldadura	30
2.3.4.1 Clasificación de los procesos de soldadura	31
2.3.4.2 Tipos de soldaduras	31
2.4 Planta de producción ácido sulfúrico	33
2.4.1 Industria petroquímica	33
2.4.2 Descripción y usos	33
2.4.3 Producción	36
2.4.4 Funcionamiento de la planta	40

### **CAPITULO III**

#### **Marco Metodológico.**

3.1 Introducción	41
3.2 Nivel de la investigación	41
3.3 Diseño de la investigación	41
3.4 Determinar la condición actual	43
3.4.1 Métodos de inspección	44
3.4.2 Datos registrados	44
3.4.3 Reuniones con especialistas	44
3.5 Análisis y procesamiento de datos	44
3.6 Propuesta de la condición funcional	45

### **CAPÍTULO IV**

#### **Resultados y Análisis.**

4.1 Análisis e interpretación de los resultados	47
4.1.1 Antecedentes de la planta	47
4.1.2 Investigación documental	47
4.1.2.1 Revisión de planos	47
4.1.2.2 Información de procesos	48

4.1.3 Inspecciones técnicas	48
4.1.3.1 Observación in Situ	48
4.1.3.2 Personal especializado	53
4.1.4 Ensayo no destructivos	53
4.1.4.1 Termografía	54
4.1.4.2 Medición de espesores	66
4.1.4.3 Líquidos penetrantes	69
4.1.5 Cálculos estructurales	71
4.2 Diagnóstico que sustenta la propuesta	81
4.2.1 Identificación de problemas	83
4.3 Estrategia para generar y seleccionar alternativa de solución	83
4.3.1 Implementación del cambio de material	83
4.3.2 Levantamiento 3D del elemento de estudio	85
4.3.3 Generación de las alternativas de solución	86
4.3.3.1 Método de ponderación de criterios para alternativas	87
4.3.4 Generación de las alternativas de solución finales	89
4.3.4.1 Método de ponderación de criterios para alternativas de solución finales	91
4.4 Mejor solución	95
4.5 Formulación de la propuesta de solución	112

## **CAPÍTULO V**

### **Conclusiones y recomendaciones.**

5.1 Conclusiones	115
5.2 Recomendaciones	116
Referencias	117
Anexos	
Apéndices	

# Índice de tablas

---

---

2.1 Características del ácido sulfúrico.	35
4.1 Descripción de la inspección.	54
4.2 Resultados de medición de espesor.	67
4.3 Selección de las soluciones evaluándolas con las restricciones.	89
4.4 Selección de las soluciones evaluándolas con las restricciones.	92
4.5 Ponderación de criterios.	92
4.6 Criterio 1.	93
4.7 Criterio 2.	93
4.8 Criterio 3.	93
4.9 Criterio 4.	94
4.10 Propiedades del material.	96
4.11 Sujeciones faldón sin refuerzos.	97
4.12 Carga faldón sin refuerzos.	97
4.13 Sujeciones faldón con refuerzos.	97
4.14 Carga faldón con refuerzos.	98
4.15 Información de malla.	98
4.16 Información de malla – detalles, faldón sin refuerzo.	98
4.17 Información de malla – detalles, faldón con refuerzo.	99

4.18 Fuerzas de reacción, faldón sin refuerzo.	99
4.19 Fuerzas de reacción, faldón con refuerzo.	99

# CAPÍTULO 1

## *Problema de Investigación*

---

---

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Hoy en día la gestión del mantenimiento a nivel industrial es de gran importancia, debido a que apoya de manera considerable la productividad y la competitividad de las empresas. En la actualidad, y gracias a las tecnologías desarrolladas, es posible conocer diversos factores que ocasionan daños o podrían ocasionarlos; revelar las fallas existentes y sus posibles zonas críticas, entre otros. En el presente capítulo se plantea la situación problemática, la cual se basa en la condición operativa de la torre de absorción C-03, debido a que surge la necesidad de tener un conocimiento claro de la misma, puesto que se desea extender el nivel operativo por algunos años, antes de su reemplazo, mediante el conocimiento y utilización de herramientas del mantenimiento preventivo y predictivo.

### **1.2 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

Las estructuras y los componentes de las máquinas, están sometidos a cargas repetitivas (fatiga), como es el caso de los elementos que componen puentes, grúas, aviones, automóviles, reactores y otros equipos. Cuando se

diseñan estos componentes mecánicos, lo que se busca principalmente es que soporten la acción de los agentes internos y externos a los cuales van a estar sometidos durante el proceso de producción, y así garantizar un determinado tiempo de vida útil. A nivel mundial, el mantenimiento predictivo se basa en la existencia de sistemas de inspección con pruebas destructivas o no destructivas para garantizar que ciertos equipos tengan un funcionamiento con total normalidad. Dichos sistemas de inspección garantizan que los equipos funcionen sin fallas, mecánicas o estructurales, dentro de un factor de seguridad previamente establecido.

En Venezuela las empresas se enfocan principalmente a la producción, y en cierta forma pudieran estar relegando la prevención del deterioro natural que sufren los equipos en su vida normal de funcionamiento, y esto puede resultar en paradas no programadas, disminución de la producción, aumento de los costos de operación y el incremento del riesgo de accidentes.

En el Complejo Petroquímico Morón (Pequiven), en las plantas de producción de ácido sulfúrico (215, 218), constituidas por 3 torres de absorción, siendo una de ellas la torre C-03, es en donde se enfocará la investigación del presente trabajo especial de grado. En el interior de la misma, en su parte superior interna, contiene unos distribuidores de ácido, los cuales rocían por gravedad, a través de un relleno de materiales cerámicos, al ácido sulfúrico, y por la parte inferior en contra flujo ingresa aire con contenido de ácido sulfúrico ( $\text{SO}_2$ ) logrando el enriquecimiento del ácido.

La torre de absorción C-03 ha presentado algunas paradas no programadas interrumpiendo su funcionamiento normal, siendo estas paradas de gran impacto, y de alto riesgo en relación a las fallas en la estructura, fallas en armazón, fugas y otros. Esto involucra tanto a los activos de la planta como al personal que se desempeña en el área.

Por lo antes expuesto se hace imperativa la elaboración de una propuesta de evaluación de la condición operativa de la Torre de Absorción de una

planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica en relación a su componente estructural, basados en inspecciones mediante ensayos no destructivos al equipo, para garantizar la condición operativa del equipo bajo los estándares de seguridad y calidad del producto, por lo menos hasta el 2014, fecha en la cual se estima reemplazar la existente e instalar otra planta de tecnología de punta.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la condición operativa de la Torre de Absorción C-03 de la planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica para elaborar una propuesta de mejora en relación a su componente estructural.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- a) Identificar la situación actual de funcionamiento de la Torre de Absorción C-03 de la planta de producción de ácido sulfúrico.
- b) Establecer las alternativas de posibles soluciones al problema de la Torre de Absorción C-03 de la planta de producción de ácido sulfúrico.
- c) Seleccionar la mejor alternativa de solución para la Torre de Absorción C-03 de la planta de producción de ácido sulfúrico.
- d) Analizar la propuesta de solución de la Torre de Absorción C-03 de la planta de producción de ácido sulfúrico.
- e) Proponer alternativa de solución en Torre de Absorción C-03 de la planta de producción de ácido sulfúrico de una empresa petroquímica.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

En los sistemas de producción es primordial prevenir y evitar las fallas, ya que con la prevención se reducirán las acciones correctivas, con la consiguiente disminución de los costos y aumento de la producción. En este

sentido se debe garantizar y prolongar la vida útil de los equipos mediante las inspecciones programadas, para determinar las condiciones de funcionamiento actuales de los mismos, y así poder establecer las acciones pertinentes para realizar las correcciones necesarias a objeto de garantizar la producción, la salud y seguridad integral de los trabajadores.

El sistema en estudio procesa un material muy corrosivo, como lo es el ácido sulfúrico, el cual es considerado un material peligroso, las fugas y desprendimientos de vapores que se pudieran producir pueden traer consecuencias graves al ser humano. Además, por su ubicación geográfica frente al mar Caribe, las instalaciones son de alto riesgo con relación a las condiciones atmosféricas del lugar y por lo tanto, se requiere garantizar la seguridad en el proceso, de las personas y los activos de la empresa.

La empresa Pequiven-Morón requiere conocer el estado actual de la Torre de Absorción C-3 con relación a su vida útil, para garantizar su adecuado funcionamiento hasta el año 2014, donde a futuro se tiene planificado el reemplazo del equipo antes mencionado. Además, se pretende enseñar la cultura de la prevención, cubriendo el vacío de información y de formación de todas aquellas personas que desarrollan su labor profesional en los sistemas de producción.

## **1.5 ALCANCE**

- a) Esta investigación se fundamenta en determinar la condición operativa del equipo en lo que corresponde a:
  - Estructural
  - Resistiva
  - Metalurgia
- b) El trabajo a realizar se fundamenta en la evaluación de la condición operacional de la Torre de Absorción C-03 (Pequiven-Morón) y la generación de una propuesta de solución para ésta.

- c) Solo se realizarán ensayos no destructivos, tales como líquido penetrante, termografías, medición de espesores, debido a que la torre de absorción está en funcionamiento.

## 1.6 LIMITACIONES

Las restricciones que pudieran presentarse durante el desarrollo de este trabajo de grado son:

- a) El lugar de operación de la torre de absorción es una zona de alto riesgo, por ser una planta de ácido sulfúrico, esto puede afectar al momento de la inspección y observación de la misma.
- b) Falta de información en algunos casos por el criterio de confidencialidad; prohibición de tomas fotográficas en algunas áreas.

## 1.7 ANTECEDENTES

A continuación se destacan algunos antecedentes en el área objeto de estudio, los cuales se han realizado dentro del contexto de la investigación y que sirven de apoyo metodológico y conceptual.

**Santa Cruz, et al, (2006)** Realizó una investigación titulada “optimización de una torre de absorción en una planta de endulzamiento de gas natural”, que sirvió como trabajo especial de grado para ingeniería química en la Universidad Autónoma de Yucatán, México. Este trabajo tuvo como objetivo diseñar estrategias para las condiciones óptimas en la cuales una columna de absorción de gas amargo debe operar en una planta de endulzamiento de gas natural, buscando minimizar la cantidad de dictanolamina que se requiere para el proceso, lo cual significa un ahorro en los costos de operación de la torre. Estas condiciones se alcanzaron mediante la aplicación de estrategias de simulación y optimización. Se concluyó que de acuerdo a los resultados obtenidos se pueden definir condiciones de operación que ofrecen una mejora en el desempeño de la columna de absorción, ya que se redujo de manera

significativa la cantidad de sulfuro de hidrogeno contenido en la corriente de salida.

**Herrera, et al, (2007)** Realizó una investigación titulada “Tendencias actuales para determinar la degradación de los materiales metálicos de componentes industriales”. Este trabajo tuvo como objetivo presentar las tendencias actuales en las metodologías para evaluar el daño de los materiales metálicos constructivos, y la vida residual de las instalaciones de la industria energética, las del petróleo y otros procesos químicos. Se refieren algunas de las ideas existentes sobre los fundamentos de la inspección de los componentes para detectar los defectos en el material metálico. Se concluyó que las inspecciones en servicios, utilizando fundamentalmente la aplicación de ensayos que no afecten el material de la componente, suministran información objetiva para el diagnóstico de su estado.

**Xiao, et al, (2008)** Esta investigación trabajó sobre la formación y el desarrollo de productos de corrosión en la superficie de aceros al carbón durante la etapa inicial de corrosión atmosférica, lo cual fue simulado en un laboratorio y estudiado por el análisis de la microscopía de electrones y la espectroscopia Raman. Los resultados mostraron que existen dos formas diferentes de los productos de corrosión, es decir, anillo y cadena, ambos formados en la etapa inicial de corrosión. Se concluyó sobre el hallazgo de racimos de MnS (sulfuro de manganeso) presentes en los núcleos de los productos de corrosión en los sitios activos de corrosión locales.

**Cabeza, et al, (2006)** Realizó una investigación titulada “El análisis de riesgo cuantitativo como una poderosa herramienta para la planificación estratégica de proceso petroquímico”. Este trabajo tuvo como objetivo específico la revisión cuantitativa de los riesgos que pueden presentarse en la industria de procesos petroquímicos. Por medio de una planificación estratégica, apoyada sobre la metodología Análisis de Riesgo Cuantitativo (ARC), siendo la misma

de carácter uniforme y consistente, pueden evitarse riesgos que ocasionen pequeños incidentes frecuentes de bajas consecuencias, hasta incidentes de mayores magnitudes y poco comunes. Se concluyó que el análisis cuantitativo del riesgo, permite acotar los distintos riesgos que pueden ocurrir en el sector industrial; ya que los riesgos mayores pueden identificarse a partir de un estudio del inventario.

**Katayama, et al, (2004)** Este estudio sobre la simulación de la corrosión atmosférica del acero al carbono se realizó con el fin de aclarar el mecanismo de acción de ella sobre el acero al carbono. La simulación de la corrosión se llevó a cabo en una cámara mediante el control de los factores ambientales tales como temperatura, humedad relativa y temperatura de los aceros al carbono. Los resultados alcanzados por la simulación de la corrosión utilizó sólo datos de temperatura y humedad relativa, aunque el acero al carbono empleado mostró casi el mismo comportamiento a la corrosión cuando se expone al ambiente, la superficie corroída de la simulación era más pequeña que este segundo caso. Con el fin de simular la condensación de la humedad, la temperatura del acero al carbono fue controlada por un sistema de refrigeración. Como hallazgo de la simulación a la corrosión, tanto el comportamiento de la corrosión y la zona corroída, se observó que eran casi las mismas que en ambiente al aire libre. Se concluyó, que al inicio la corrosión atmosférica del acero al carbono, en el ambiente protegido, podría ser simulada en la cámara mediante el control de la temperatura, la humedad relativa y la temperatura de los materiales.

**Rubertis, et al, (2007)** Realizó una investigación titulada “Evaluación de integridad estructural, análisis de riesgo (RBI) y desarrollo de plan de integridad en planta de tratamiento de gas”. Este trabajo esta basado en el riesgo de una planta de tratamiento de gas, el cual incluyó la inspección planificada, externa e interna, una evaluación de integridad estructural (EIE) y el desarrollo de planes de inspección. Los resultados indican que la torre

contactora de aminas, es el equipo de mayor riesgo dentro del conjunto de equipamientos de la planta, coincidiendo con la experiencia de la industria.

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

---

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En esta sección se presenta una revisión bibliográfica de las teorías que sustentan la investigación, y conducen al cumplimiento de los objetivos planteados, así como los que facilitan el estudio. Los equipos se diseñan para una vida útil determinada, la cual representa el tiempo de servicio dentro del cual el equipo prestará sus servicios con una confiabilidad alta, pero se requiere un mantenimiento adecuado para prolongar la vida útil del equipo hasta el máximo posible, en caso contrario se puede deteriorar el activo, y como consecuencia se disminuye la vida útil del mismo. En las operaciones normales de producción se realizan los mantenimientos programados durante el ciclo de vida de los equipos, y ocasionalmente se considera una evaluación general de la confiabilidad del mismo para determinar su estado actual en forma integral.

### **2.2 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS FÍSICOS**

El mantenimiento tiene como finalidad conservar la planta industrial con los equipos, los edificios, los servicios y las instalaciones en condiciones de

cumplir con la función para la cual fueron proyectados, con la capacidad y la calidad especificadas, pudiendo ser utilizados en condiciones de seguridad y economía de acuerdo a un nivel de ocupación, y a un programa de uso definidos por los requerimientos de producción. (Sward, 2002)

### **2.2.1 Ciclo de vida de un activo físico**

La vida útil es la duración estimada que un objeto puede tener cumpliendo correctamente con la función para la cual ha sido creado. Normalmente se calcula en horas de duración.

Cuando se refiere a obras de ingeniería, se calcula en años, sobre todo para efectos de su amortización, ya que en general estas obras continúan prestando utilidad mucho más allá del tiempo estimado como vida útil para el análisis de factibilidad económica. (Arata, 2009)

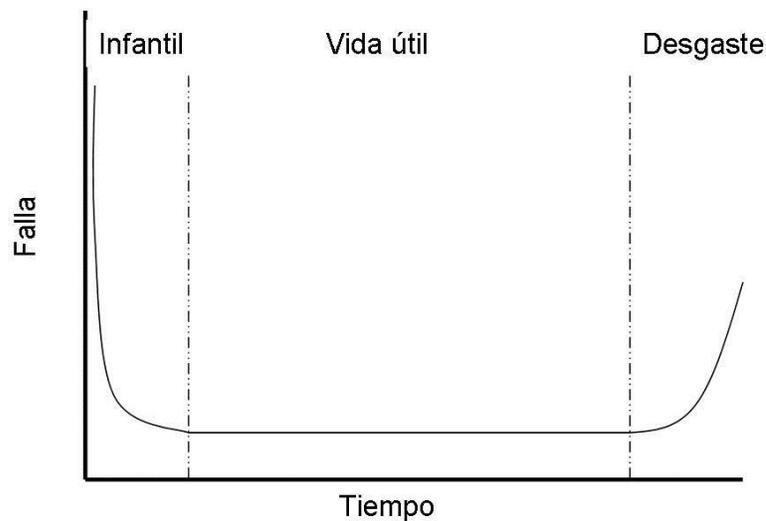
La curva del ciclo de vida de un activo, también conocida como de la bañera (ver figura 2.1) es ampliamente utilizada dentro de la ingeniería de confiabilidad, aunque el concepto general es también aplicable a los seres humanos. Describe una forma particular de función del peligro, el cuál abarca tres porciones:

Fallos iniciales (Infantil): esta etapa se caracteriza por tener una elevada tasa de fallos que desciende rápidamente con el tiempo. Estos fallos pueden deberse a diferentes razones como equipos defectuosos, instalaciones incorrectas, errores de diseño del equipo, desconocimiento del equipo por parte de los operarios o desconocimiento del procedimiento adecuado.

Fallos normales (Vida útil): etapa con una tasa de menor de fallas y constante. Los fallos no se producen debido a causas inherentes al equipo, sino por causas aleatorias externas. Estas causas pueden ser accidentes fortuitos, mala operación, condiciones inadecuadas u otras.

Fallos de desgaste (Degaste): etapa caracterizada por una tasa de fallas rápidamente creciente. Los fallos se producen por desgaste natural del equipo debido al transcurso del tiempo.

En la vida temprana de un producto que se adhiere a la curva de la bañera, el porcentaje de averías es alto, pero rápidamente disminuye pues se identifican y se desechan los productos defectuosos, y las fuentes tempranas de la falta potencial, tales como error de la dirección y de la instalación, se superan. En la mitad de la vida de un producto, generalmente, una vez que alcance a consumidores - el porcentaje de averías es bajo y constante. En la última vida del producto, aumenta el porcentaje de averías y desgaste. (Arata, 2009)



**Figura 2.1.** Curva del Ciclo de Vida de un Activo Físico. (Arata, 2009)

## 2.2.2 Tipos de mantenimiento

### 2.2.2.1 Mantenimiento correctivo

Comprende el que se lleva a cabo con el fin de corregir (reparar) una falla en el equipo. Se clasifica en:

No planificado: es el mantenimiento de emergencia (reparación de roturas). Debe efectuarse con urgencia, ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible, o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, entre otras).

Planificado: se sabe con antelación qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente. (Rosaler, 1997)

#### **2.2.2.2 Mantenimiento preventivo**

Cubre todo el mantenimiento programado que se realiza con el fin de: prevenir la ocurrencia de fallas. Se conoce como mantenimiento preventivo directo o periódico - FTM (Fixed Time Maintenance) por cuanto sus actividades están controladas por el tiempo. Se basa en la confiabilidad de los Equipos sin considerar las peculiaridades de una instalación dada. Ejemplos: limpieza, lubricación, recambios programados. (Rosaler, 1997)

#### **2.2.2.3 Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo que está basado en la determinación del estado de la máquina en operación. El concepto se basa en que las máquinas darán un tipo de aviso antes de que fallen, y este mantenimiento trata de percibir los síntomas, para después tomar acciones. (Rosaler, 1997)

#### **2.2.2.4 Mantenimiento de mejora**

Consiste en modificaciones o agregados que se pueden hacer a los equipos, si ello constituye una ventaja técnica y/o económica, y si permiten reducir, simplificar o eliminar operaciones de mantenimiento. (Rosaler, 1997)

### **2.2.2.5 Mantenimiento de oportunidad**

Aprovechando la parada de los equipos por otros motivos y según la oportunidad calculada sobre bases estadísticas, técnicas y económicas, se procede a un mantenimiento programado de algunos componentes predeterminados de aquéllos. (Rosaler, 1997)

## **2.3 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN OPERATIVA DEL COMPONENTE ESTRUCTURAL DE UN ACTIVO**

En este caso para lograr la evaluación operativa, en cuanto a su componente estructural, de la Torre de Absorción C-03 de una planta de producción de ácido sulfúrico de una industria petroquímica en Venezuela, se han tomado en consideración los siguientes aspectos conceptuales los cuales apoyan la elaboración de la propuesta de mejora:

- a) Materiales involucrados.
- b) Tipos de fallos del material.
- c) Ensayos para determinar fallas en el material.
- d) La soldadura como medio de corregir fallas en la estructura de un activo.

### **2.3.1 Materiales Involucrados**

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2 – 0,3%. Por su alta versatilidad y disponibilidad; sus dos elementos primordiales abundan en la naturaleza facilitando su producción en grandes cantidades. Los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas.

### 2.3.1.1 Clasificación de los Aceros

Los aceros pueden ser clasificados por una variedad de distintos sistemas. Aquí se especifica la clasificación más común:

- a) Aceros al Carbono: más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, entre otros.

Los aceros al carbono se clasifican en general en función de la proporción (por peso) del contenido de carbono. (Kalpakjian, 2008).

- Aceros al bajo carbón, también conocido como acero suave o dulce, que tienen menos de 0,30% de carbono. Comúnmente es utilizado para productos industriales comunes, como pernos, tuercas, láminas, placas, tubos y para componentes de máquinas que no requieren de alta resistencia.
- El acero al medio carbono, tiene de 0,30 – 0,60% de carbono. Es generalmente utilizado en aplicaciones, que requieren una resistencia más elevada a la disponible en los aceros de bajo carbono, como piezas de equipo de maquinaria automotriz y equipo agrícola (engranes, ejes, bielas, cigüeñales), en equipo de ferrocarriles, y en piezas para maquinaria de trabajo de metales.
- El acero de alto carbono tiene más de 0.60% de carbono. Se utiliza por lo general para partes que requieren resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste, como las herramientas de corte, cable, alambre para música (cuerdas), resortes y cuchillería. Después de haber sido manufacturado a su forma, las piezas por lo general son tratadas térmicamente y templadas. Mientras más elevado sea el contenido de

carbono del acero, mas alta será su dureza, su resistencia mecánica y su resistencia al desgaste después del tratamiento térmico.

- También están disponibles aceros al carbono que contienen azufre y fósforo; se conocen como aceros al carbono sulfatados y aceros al carbono refosfatados.
- b) Aceros Aleados: estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros se emplean, por ejemplo para fabricar engranajes y ejes de motores, patines o cuchillos de corte. (Falk, 1986).
- c) Aceros de baja aleación ultra resistentes: en estos aceros la suma de los elementos de aleación asciende como máximo al 5%. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales, ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación, las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios. (Falk, 1986).
- d) Aceros Inoxidables: contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes al herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. Debido a su superficie brillante, en arquitectura se emplea muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se

utiliza para las tuberías y tanques de refinería de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También, se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de la corrosión de los fluidos corporales.

- e) Aceros de Herramientas: estos aceros se utilizan para fabricar muchos tipos de herramientas, cabezales de corte y modelado de máquinas empleadas en diversas operaciones de fabricación. Contienen volframio, molibdeno y otros elementos de aleación, que le proporcionan mayor resistencia, dureza y durabilidad.

## **2.3.2 Tipos de Fallas en el Material**

### **2.3.2.1 Corrosión**

Se denomina corrosión al proceso de destrucción de los metales y sus aleaciones, provocado por la acción química o electroquímica. La corrosión causa un enorme daño a la economía de los países. Esto se manifiesta en la pérdida irreversible anualmente de millones de toneladas de metales. Por ejemplo, a causa de la corrosión se pierde cerca del 10% de todo el metal ferroso producido. (Ortega, 1990)

#### **2.3.2.1.1 Naturaleza de la Corrosión**

El estudio del proceso de corrosión en los metales indica que se subdivide en:

- a) Química.
- b) Electroquímica.

Por corrosión química se entiende la destrucción del metal u otro material por la acción de gases o líquidos no electrolíticos (gasolina, aceites, entre otros). En la corrosión química, sobre la superficie del metal se forma una película de óxidos. La solidez de esta película es diferente para los diferentes

metales y aleaciones. En las aleaciones de hierro con carbono, la película de óxidos es débil, se destruye con facilidad y la oxidación continúa realizándose hacia el interior de la pieza.

En otros metales y aleaciones las películas de óxido son muy resistentes. Por ejemplo, al oxidarse el aluminio, sobre su superficie se origina una película firme de óxidos que protege el metal contra la oxidación ulterior.

En cuanto a la corrosión electroquímica, ésta se denomina así debido a los procesos que se desarrollan por acción de electrólitos sobre el metal. Los procesos electrolíticos pueden ser muy complejos en dependencia de la naturaleza del metal y del electrólito, pero en general corresponden a una reacción de oxidación-reducción, en la que el metal sufre un proceso de oxidación y se destruye (se disuelve). Al mismo tiempo el hidrógeno presente en la solución acuosa se reduce y se desprende oxígeno elemental de la disolución que corroe adicionalmente el metal.

Las aguas naturales que contienen sales, el aire húmedo, las soluciones ácidas, de álcalis o salinas son los electrólitos más comunes con los que entran en contacto los metales en la práctica.

La tendencia de los metales a ceder a la disolución sus iones, se llama presión de disolución. Cada metal tiene su propia presión de disolución. A consecuencia de esto, si se colocan diferentes metales dentro de un mismo electrólito, cada uno adquiere diferente potencial eléctrico y forman pares galvánicos. En estos pares, el metal con potencial mas bajo (mayor presión de disolución), pasa a ser el ánodo y se destruye, es decir, se oxida o pasa a la disolución. El segundo metal con potencial mayor actúa como cátodo y no se disuelve.

Con esto se explican los procesos que se desarrollan durante la corrosión electroquímica de los metales técnicos (aleaciones). Al sumergir tal metal en el electrolítico, sus diferentes partes adquieren diferentes potenciales y como

en el interior del metal estos componentes están en corto circuito, entonces este sistema se puede considerar como un conjunto de múltiple pares galvánicos conectados. La destrucción del metal comienza desde la superficie del sistema metal-medio y se propaga paulatinamente dentro del metal. (Ortega, 1990)

#### **2.3.2.1.2 Tipos de Corrosión**

Las destrucciones por corrosión pueden dividirse en los siguientes tipos:

- a) Corrosión uniforme.
- b) Corrosión local.
- c) Corrosión intercrystalina. (Ortega, 1990)

#### **2.3.2.1.3 Efecto de la Temperatura**

Cuando la corrosión es controlada por la difusión del oxígeno, la velocidad de corrosión a una concentración dada de  $O_2$  es aproximadamente el doble para aumento de  $30^\circ C$  en la temperatura.

Cuando la corrosión es acompañada por la evolución de hidrógeno, el incremento en la velocidad es más del doble para los  $30^\circ C$  de aumento de la temperatura. (Uzcategui, 2008).

#### **2.3.2.1.4 Efecto del pH**

Dentro del rango de pH 4 a 10, la velocidad de corrosión es independiente del pH y depende de cómo el oxígeno se difunda rápidamente en la superficie del hierro. En este rango de 4 a 10, la longitud de la superficie catódica aparentemente no es importante.

Dentro del rango ácido o  $pH < 4$ , la película de óxido ferroso hidratado es disuelta, el pH superficial cae y el hierro está más o menos en contacto directo con el medio acuoso.

En el rango de pH >10, la velocidad de corrosión decrece rápidamente, debido a que se incrementa la alcalinidad del medio, aumentando así el pH de la superficie del hierro, llegando este a ser más pasivo. (Uzcategui, 2008).

#### **2.3.2.1.5 Corrosión por agua de mar**

El agua de mar contiene 3,4% de NaCl (Cloruro de Sodio), es ligeramente alcalina de pH8, es un buen electrolito y puede causar corrosión galvánica por estancamiento, entre otros, y ésta corrosión se ve afectada por el contenido de oxígeno, la velocidad, la temperatura y organismos biológicos. En un material expuesto al agua del mar, el máximo ataque ocurre en la zona humedecida o salpicada, o rociada debido al humedecimiento y secado alternado y aireación. En el mar a grandes profundidades generalmente la corrosión disminuye debido a que la temperatura es baja, cerca de 4-5°. Las aguas salinas, son aguas contenidas en cloruro. (Uzcategui, 2008).

#### **2.3.2.1.6 Corrosión Atmosférica**

Esta forma de corrosión generalmente se produce por desgaste superficial uniforme. Para el acero, ésta es la forma casi exclusiva de corrosión, salvo en algunos casos muy particulares de localización como ocurre en el aire marítimo, con fuerte humedecimiento y pulverización de agua salada, en las cuales se forman picaduras, perforaciones o ataques intercrystalinos, que solo se observan ocasionalmente y en muy pequeñas proporciones.

Con la excepción de los casos particulares citados, se puede establecer que en el ataque atmosférico predomine casi siempre el desgaste superficial uniforme, hecho que puede tomarse como característico de la acción atmosférica. (Uzcategui, 2008).

Factores que afectan la corrosión en la atmósfera:

- a) Humedad relativa
- b) Contaminación
- c) Temperatura
- d) Polvo atmosférico
- e) Películas de óxido
- f) Efectos de las precipitaciones.

### **2.3.2.2 Fatiga**

La fatiga de materiales se refiere a un fenómeno, por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas (fuerzas repetidas aplicadas sobre el material) se produce ante cargas inferiores a las cargas estáticas que producirían la rotura. La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes. Su principal peligro es que puede ocurrir a una tensión menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática, y aparecer sin previo aviso, causando roturas catastróficas. Es un fenómeno muy importante, ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también está presente en polímeros y en cerámicas.

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aún en metales dúctiles, puesto que no hay apenas deformación plástica asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras, que crecen desde un tamaño inicial microscópico hasta un tamaño macroscópico capaz de comprometer la integridad estructural del material. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo. Aunque es un fenómeno que, sin definición formal, era reconocido desde periodos antiguos, este comportamiento no fue de interés real hasta la Revolución Industrial, cuando, a mediados del siglo XIX comenzaron a producirse roturas en los ejes de las

ruedas de los trenes, que pugnaban, por aquel entonces, por imponerse como medio de locomoción.

Los factores o razones que inciden directamente en la elevación local de los esfuerzos y, por tanto, en la etapa de inicio de la fatiga suelen ser de tipo geométrico, mecánico, metalúrgico, de tamaño y ambiental. (Avilés, 2005)

- Factores geométricos. Aspectos de forma, tales como los cambios bruscos de sección, aristas y esquinas vivas o sin radio, bordes de agujeros, rugosidades superficiales, marcas de maquinado, deformaciones superficiales, entre otros, pueden actuar como concentradores de los esfuerzos, haciendo que en dichos lugares se alcancen valores de hasta tres (3) y más veces el esfuerzo nominal.
- Factores mecánicos. Las sobrecargas frecuentes, la presencia de tensiones residuales y el tipo de carga (impactos, desbalances, vibraciones, entre otros) pueden contribuir al agrietamiento prematuro y progresivo de los componentes.
- Factores metalúrgicos. En este caso es preciso considerar los siguientes niveles:
  1. Aquellos aspectos de tipo estructural inherentes a la naturaleza propia de los sólidos policristalinos, como el carácter aleatorio de la orientación de los planos atómicos dentro de cada grano, y la mayor o menor presencia de dislocaciones, hacen que la resistencia varíe de un grano o cristal a otro, y promueven la iniciación de microgrietas en aquel o aquellos cristales de mínima resistencia.
  2. Aquellos aspectos de tipo estructural derivados del procesamiento del material y/o de la manufactura de la pieza como los poros, cavidades de contracción e inclusiones no metálicas, pueden servir de concentradores de las tensiones.

3. Así mismo, la heterogeneidad desde tipo químico o estructural como las segregaciones, el cambio de tamaño de grano y de fase debido a calentamientos durante la fabricación, el ensamble de las partes o el servicio, pueden dar lugar a alteraciones de la resistencia del material en las áreas afectadas.
  4. El factor tamaño. A mayor tamaño de la pieza, y bajo las mismas condiciones de esfuerzo, aumenta el volumen del material bajo esfuerzo, y, por tanto, la probabilidad de encontrar en él zonas defectuosas o de baja resistencia que lleven a la iniciación de grietas de fatiga.
- Factores ambientales. La naturaleza del medio en que se desempeña el componente (contaminantes, temperaturas bajas o altas, humedad, entre otros) puede contribuir a crear problemas de corrosión o a deteriorar las propiedades mecánicas del material (fragilización, pérdida de resistencia, por ejemplo), favoreciendo así la iniciación de grietas de fatiga.

Como puede verse, son muchos los factores que propician la iniciación de grietas de fatiga en los metales, por lo que resulta prácticamente imposible predecir eventos de esta naturaleza, y mucho más diseñar y fabricar elementos mecánicos totalmente seguros contra este tipo de falla.(Avilés, 2005)

#### **2.3.2.2.1 Fatiga con Corrosión**

La fatiga con corrosión ocurre por acción de una tensión cíclica y ataque químico simultáneo. Lógicamente los medios corrosivos tienen una influencia negativa y reducen la vida a fatiga, incluso la atmósfera normal afecta a algunos materiales. En consecuencia pueden producirse pequeñas fisuras o picaduras que se comportarán como concentradoras de tensiones, originando grietas. La propagación también aumenta en el medio corrosivo, puesto que

el medio corrosivo también corroerá el interior de la grieta produciendo nuevos concentradores de tensión.

La fatiga con corrosión se caracteriza, por que:

- Producción de un material como consecuencia de la acción conjunta de un medio corrosivo y un esfuerzo mecánico fluctuante en el tiempo.
- Existe un efecto conjunto de las tensiones cíclicas y del medio corrosivo.
- El efecto conjunto conduce normalmente a la rotura de las capas pasivas que favorece a la formación y el desarrollo de las grietas.

#### **2.3.2.2 Determinación de vida remanente**

Otra necesidad actual, es la determinación de la vida remanente de equipos, con el objetivo de optimizar los servicios de mantenimiento y permitir la aplicación de sistemas de garantía de calidad que tengan la confianza tanto de la sociedad como de la administración de la compañía. Hay software para facilitar la determinación de vida remanente para calderas, hornos, reactores y tanques de almacenamiento. Hay sistemas de análisis que integran los estudios de vida restante, análisis de falla e integridad estructural con el criterio de análisis y gestión de riesgos de ingeniería. Esta metodología ha sido aplicada tanto en materiales que operan a temperaturas altas, así como en materiales que operan bajo presiones internas o externas, como las cañerías para los pozos de extracción de gas y plantas de compresores de gas.

La metodología consiste en seguir un procedimiento sistemático que permite verificar, con cierto grado de precisión, si un componente o su estructura, operando bajo ciertas condiciones conocidas, pueden continuar en servicio, manteniendo un nivel de riesgo aceptable, por un periodo de tiempo

prefijado, o si debe repararse inmediatamente, o si debe ser rechazado definitivamente. (Avilés, 2005)

### **2.3.3 Ensayos para determinar fallas en el material**

Se denomina ensayo de materiales a toda prueba, cuyo fin es determinar las propiedades mecánicas de un material.

Los ensayos de materiales pueden ser de dos tipos: ensayos destructivos y ensayos no destructivos.

#### *Ensayos Destructivos.*

Son aquellos en los que los materiales sometidos a este tipo de experimentos ven alteradas su forma y presentación inicial.

Entre los ensayos destructivos más comunes se encuentran los siguientes:

- Ensayo de Tracción.
- Ensayo de Compresión.
- Ensayo de Cizallamiento.
- Ensayo de Flexión.
- Ensayo de torsión.
- Ensayo de Resiliencia.
- Ensayo de Fatiga de Materiales.
- Ensayo de Fluencia en Caliente.

#### *Ensayos No Destructivos. (END)*

El propósito de estos ensayos es detectar discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes y partes fabricadas.

Los materiales que se pueden inspeccionar son los más diversos, entre metálicos y no metálicos, normalmente utilizados en procesos de fabricación, tales como: laminados, fundidos, forjados y otras conformaciones.

Los ensayos son realizados bajo procedimientos escritos, que atienden a los requisitos de las principales normas o códigos de fabricación, tales como el ASME, ASTM, API y el AWS entre otros.

Los ensayos no destructivos, más comunes utilizados en la industria, se clasifican de acuerdo al alcance que poseen en cuanto a la detección de fallas, por lo que se dividirán los mismos de acuerdo a los siguientes parámetros:

Discontinuidades superficiales:

- Ensayo de líquidos penetrantes.
- Ensayo de partículas magnéticas.

Discontinuidades internas:

- Ensayo radiográfico.
- Ensayo ultrasónico.

Ensayos aplicables para la detección de discontinuidades del material o de los procesos de soldaduras superficiales abiertos al exterior, y para la detección de discontinuidades internas del material, abiertas o no al exterior. (Gómez, 2006)

### **2.3.3.1 Ensayos para la determinación de fallas**

#### **2.3.3.1.1 Medición de espesores**

Las tecnologías de ensayos no destructivos se usan para medir el espesor de materiales en numerosos campos, desde el control de la calidad de fabricación hasta el monitoreo durante el servicio. En muchas aplicaciones, la primera ventaja que brindan los ensayos no destructivos, es la posibilidad

de medir con precisión el espesor de paredes en situaciones en las que sólo un lado de la pieza bajo ensayo es accesible, como en los tubos o tanques, o donde las simples mediciones mecánicas son imposibles o difíciles de realizar debido a diferentes razones, como las dimensiones de la pieza o la dificultad de acceso. Los medidores de espesor por ultrasonidos pueden ser empleados en prácticamente todos los materiales industriales, como la mayoría de los metales, plásticos, vidrio, cerámica, caucho, fibra de vidrio y compuestos. Los equipos por corrientes de Foucault sirven para medir las delgadas capas de los materiales conductores, como el recubrimiento metálico de las aeronaves o los tubos de metal de paredes finas. También, pueden medir el espesor de los recubrimientos no conductores, como la pintura aplicada sobre sustratos conductores. (Borrás, 2003)

#### **2.3.3.1.2 Líquidos penetrantes**

El examen por líquidos penetrantes es un método de ensayo no destructivo, se usa para la detección de defectos e irregularidades siempre que estas se encuentren abiertas a la superficie.

Se puede utilizar tanto en materiales ferrosos como no ferrosos, siendo su campo de aplicación más idóneo el de materiales no magnéticos (Aluminio, Bronces, Latones, entre otros), al no utilizarse otras técnicas por su difícil aplicación y elevado coste. No se puede aplicar en materiales sólidos porosos.

Es un ensayo rápido, económico y que puede realizarse sin necesidad de suministro eléctrico en lugares alejados y de difícil acceso. Dentro de los diferentes tipos de ensayos se puede disponer desde un pequeño conjunto de envases-spray de fácil manejo y transporte, hasta grandes instalaciones automatizadas para ensayar grandes series.

### *Etapas del Ensayo.*

a) Preparación de la superficie a ensayar.

La superficie deberá de estar libre de agua, aceite, grasas o cualquier otro contaminante que perjudique las características de extensión, mojado y penetración del penetrante, o liquido colorante.

b) Aplicación del penetrante.

Consiste en la aplicación del penetrante sobre la superficie a ensayar, una vez que se encuentra limpia y seca, ya sea por inmersión de la pieza en un baño, por aplicación del penetrante con brocha, o aplicado por pulverización empleando un compresor de aire.

La película de penetrante deberá en cualquier caso, ser uniforme y mantenerse sobre la superficie el tiempo suficiente para conseguir el máximo de penetración en el interior de las discontinuidades.

c) Eliminación del exceso de penetrante.

Consiste en hacer desaparecer de la superficie a examinar, todo el penetrante aplicado y que no haya entrado en las discontinuidades. La eliminación ha de ser completa ya que si no, se pueden encontrar trazas de penetrantes en la fase de observación final que lleguen a enmascarar el ensayo.

d) Revelado.

Consiste en la aplicación del revelador sobre la superficie objeto del estudio, toda vez que ha sido limpiada de penetrante y este seca.

La función fundamental del revelador es actuar como secante, extrayendo el penetrante del interior de las discontinuidades y "marcándolo" claramente. Normalmente es un polvo muy fino de color blanco (para un mayor contraste), o débilmente coloreado que se aplica en finas capas de acuerdo a unos de los cuatro métodos siguientes:

- ❖ Polvos secos.
- ❖ Disueltos en medio acuoso.
- ❖ Suspensión del polvo en disolvente.
- ❖ Suspensión del polvo en agua.

e) Observaciones.

Una vez transcurrido el tiempo requerido para que el penetrante haya sido absorbido por el revelador, se pasa a una detenida observación de la superficie del ensayo en busca de posibles indicaciones que nos detecten defectos o discontinuidades.

Esta observación se hará bien con luz natural o con luz negra, dependiendo del tipo de penetrante utilizado. La importancia de la luminosidad adecuada para penetrantes visibles o lugar oscuro para la observación con penetrantes fluorescentes, es evidente, dado que no serviría de nada el cuidado en las cuatro etapas anteriores, al no evaluar correctamente los resultados finales por una mala preparación de la sala de observación.

Es importante saber que en superficies rugosas, el ensayo por penetrantes fluorescentes presenta grandes dificultades, ya que los intersticios retienen el penetrante, y al ser difícil la eliminación total del mismo, y dado que bajo luz negra la relación de contraste para el ojo humano es muy alta, se hace muy difícil evaluar el ensayo con lo que no se podría calificar correctamente. Asimismo, la eliminación del penetrante coloreado debe ser completa para no estar abocados a numerosas indicaciones falsas, que aunque más debiles, no se puede admitir para la calificación. (Borrás, 2003)

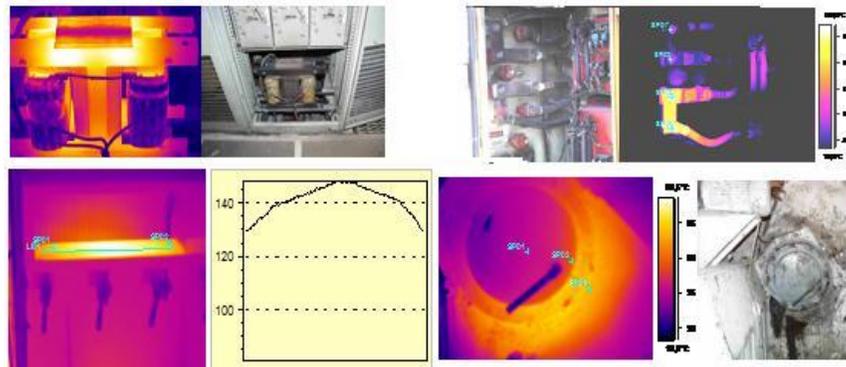
### **2.3.3.1.3 Termografía**

La Termografía es la rama de la teledetección que se ocupa de la medición de la temperatura radiada por los fenómenos de la superficie de la Tierra desde una cierta distancia. Una termografía infrarroja es la técnica de producir una imagen visible de luz infrarroja invisible (para nuestros ojos)

emitida por objetos de acuerdo a su condición térmica. Una cámara termográfica produce una imagen en vivo (visualizada como fotografía de la temperatura de la radiación).

Las cámaras miden la temperatura de cualquier objeto o superficie de la imagen y producen una imagen con colores que interpretan el diseño térmico con facilidad. Una imagen producida por una cámara infrarroja es llamada: termografía o termograma. (Ver figura 2.2)

La termografía infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar temperaturas de superficie con precisión. La Física permite convertir las mediciones de la radiación infrarroja en medición de temperatura, esto se logra midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, convirtiendo estas mediciones en señales eléctricas. (Gómez, 2006)



**Figura 2.2** Termografías. ([www.inspeccioneschile.com](http://www.inspeccioneschile.com))

#### 2.3.3.1.4 Partículas Magnéticas

La técnica de partículas magnéticas es una técnica no destructiva relativamente sencilla, basada en la propiedad de ciertos materiales de convertirse en un imán.

Es un método que utiliza principalmente corriente eléctrica para crear un flujo magnético en una pieza, y al aplicarse un polvo ferromagnético produce

la indicación donde exista distorsión en las líneas de flujo (fuga de campo). (Gómez, 2006)

#### **2.3.3.1.5 Gammagrafía Industrial**

Radiografía industrial realizada mediante un radioisótopo que emite radiación gamma.

Es un método que utiliza la radiación ionizante de alta energía que al pasar a través de un material sólido, parte de su energía es atenuada debido a diferencias de espesores, densidad o presencia de discontinuidades.

Las variaciones de atenuación o absorción son detectadas y registradas en una película radiográfica o pantalla fluorescente obteniéndose una imagen de la estructura interna de una pieza o componente.

Principio básico de la inspección radiográfica. Se basa en la propiedad que poseen los materiales de atenuar o absorber parte de la energía de radiación cuando son expuestos a esta. (Borrás, 2003)

La atenuación de la radiación ionizante es:

- a) Directamente proporcional al espesor y densidad del material.
- b) Inversamente proporcional a la energía del haz de radiación.

#### **2.3.4 Proceso de soldadura**

Una soldadura es una unión localizada entre dos materiales que es producida por una adecuada combinación de temperatura y/o presión. La mayoría de los casos involucra metales, y para obtener una fusión debe haber una combinación suficiente de proximidad y actividad entre las moléculas de las piezas unidas, para que ellas formen cristales metálicos comunes. En realidad el rango de las combinaciones de proximidad y actividad es tan grande que la unión puede producirse solo por temperatura sin ninguna presión externa, o por presión solamente, sin la aplicación de calor. Entre

estos dos extremos hay una amplia extensión de combinaciones posibles de temperatura y presión que pueden usarse para soldar.

El proceso de soldadura, como tal, recibe diferentes nombres de acuerdo a la temperatura que alcanzan los materiales involucrados en la misma, entre estos nombres se tienen: Welding que es el procedimiento de juntar dos metales donde el material base es elevado a una alta temperatura superando su punto de fusión, y en donde aprovechando su líquido, se mezcla para formar una unión de fusión de todas las partes involucradas incluyendo el material de aporte si existiera. Brazing es el procedimiento de juntar dos metales usando un material de aporte, de una temperatura de trabajo por debajo de los 427°C (800°F), pero siempre por debajo del punto de fusión del metal base. (DeGarmo, 2007).

#### **2.3.4.1 Clasificación de los procesos de Soldadura**

Se pueden distinguir primeramente los siguientes tipos de soldaduras:

- Soldadura heterogénea: se efectúa entre materiales de distinta naturaleza, con o sin metal de aportación o entre metales iguales, pero con distinto metal de aportación. Puede ser blando o fuerte.
- Soldadura homogénea: los materiales que se sueldan y el metal de aportación, si lo hay, son de la misma naturaleza. Puede ser oxiacetilénica, eléctrica (por arco voltaico o por resistencia), entre otros. Si no hay metal de aportación, las soldaduras homogéneas se denominan autógenas. Por soldaduras autógenas se entienden aquellas que se realizan sin metal de aportación, de manera que se unen cuerpos de igual naturaleza por medio de la fusión de los mismos; Así, al enfriarse, forman un todo único. (DeGarmo, 2007)

#### **2.3.4.2 Tipos de Soldaduras**

Existen diversos procesos de soldadura, estos usan una fuente de alimentación para la soldadura, crear y mantener un arco eléctrico entre un

electrodo y el material base para derretir los metales en el punto de la soldadura. Pueden usar tanto corriente continua (DC) como alterna (AC), y electrodos consumibles o no consumibles. A veces, la región de la soldadura es protegida por un cierto tipo de gas inerte o semi inerte, conocido como gas de protección, y el material de relleno a veces es usado también.

- Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas), emplea un electrodo permanente de tungsteno, aleado a veces con torio o zirconio en porcentajes no superiores a un 2%. El tungsteno (funde a 3410 °C), acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado.
- Soldadura por arco. Para realizar este tipo de soldadura se lleva a cabo el procedimiento siguiente: se induce una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar, con lo cual ioniza el aire entre ellos y pasa a ser conductor, de modo que se cierra el circuito y se crea el arco eléctrico. El calor del arco funde parcialmente el material de base y funde el material de aporte, el cual se deposita y crea el cordón de soldadura.
- Soldadura sin plomo. Es un tipo de soldadura en la que la aleación más apta era aquella compuesta por estaño/plata/cobre, también llamada SAC. La temperatura de fusión de la aleación SAC305 (96.5% Sn, 3.0% Ag, 0.5% Cu) es 34 °C superior a la de SnPb.
- Soldadura por rayo laser. Esta utiliza la energía aportada por un haz láser para fundir y recristalizar el material o los materiales que se desea unir, resultando así la unión entre los elementos involucrados. La soldadura se realiza por el calentamiento de la zona a soldar.
- Soldadura ultrasónica. Es un tipo de soldadura que utiliza una maquina con punta de base plana, superponiendo los materiales y luego haciendo bajar la punta de la maquina para provocar la fundición.

- Soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding), Este utiliza un electrodo consumible y continuo que es alimentado a la pistola junto con el gas inerte en soldadura MIG (Metal Inert Gas) o gas activo en soldadura MAG (Metal Active Gas) que crea la atmósfera protectora. (Manual de Soldadura, 2004)

## **2.4 PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO**

### **2.4.1 Industria Petroquímica**

Petroquímica es la extracción de cualquier sustancia química a partir de combustibles fósiles. Estos incluyen combustibles fósiles purificados como el metano, el propano, el butano, la gasolina, el queroseno, el gasoil, el combustible de aviación, así como pesticidas, herbicidas, fertilizantes y otros artículos como los plásticos, el asfalto o las fibras sintéticas. La industria petroquímica moderna data de finales del siglo XIX. (Fraire, 2009)

### **2.4.2 Descripción y usos**

El azufre es la principal materia prima para la producción de ácido sulfúrico, este es un elemento químico, de número atómico 16 y símbolo S. Es un no metal abundante con un olor característico. El azufre se encuentra en forma nativa en regiones volcánicas y en sus formas reducidas, formando sulfuros y sulfonales, o bien en sus formas oxidadas como sulfatos. Es un elemento químico esencial para todos los organismos y necesario para muchos aminoácidos y, por consiguiente, también para las proteínas.

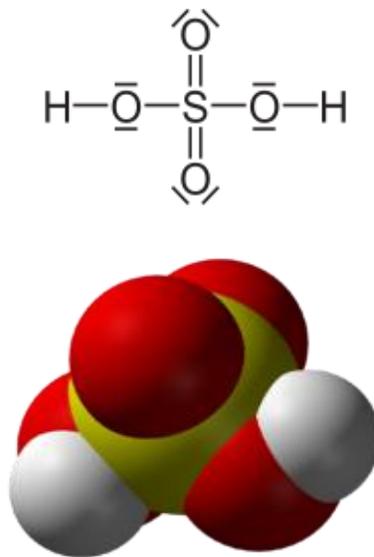
Características primordiales para la selección del azufre:

- La viscosidad del azufre debe estar entre una temperatura de 135 - 150°C, a esta temperatura el azufre se encuentran en estado líquido pero a una temperatura mayor a 150°C la viscosidad tiende a aumentar trayendo como consecuencia la solidificación del mismo.

- El contenido de ceniza y sólidos en el azufre, pueden depositarse y acumularse en las tuberías, restringiendo el flujo y bloqueando totalmente la tubería, estos sólidos también pueden tapar la boquilla del quemador, de aumentar la caída de presión en los lechos dando por resultado paradas frecuentes de planta.

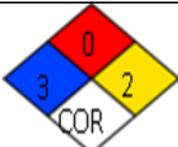
El ácido sulfúrico es un líquido viscoso, de densidad  $1,83 \text{ g/cm}^3$ , transparente e incoloro cuando se encuentra en estado puro, y de color marrón cuando contiene impurezas. En la figura 2.3 se muestra una molécula de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Es un ácido fuerte que, cuando se calienta por encima de  $30^\circ\text{C}$  desprende vapores y por encima de  $200^\circ\text{C}$  emite trióxido de azufre. En frío reacciona con todos los metales, y en caliente su reactividad se intensifica. Tiene gran afinidad por el agua y es por esta razón que extrae el agua de las materias orgánicas, carbonizándolas. (Nothomb, 2007).

Las características del ácido sulfúrico se muestran en la tabla 2.1.



**Figura 2.3** Molécula de Ácido Sulfúrico. (Nothomb, 2007)

**Tabla 2.1 Características del Ácido Sulfúrico.** (Nothomb, 2007)

Nombre químico	Acido Sulfúrico
Fórmula	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Otros nombres	Tetraoxosulfato (VI) de hidrógeno Aceite de vitriolo Licor de vitriolo Espíritu de vitriolo
Estado Físico	Líquido
Color	Claro, de incoloro a turbio, Dependiendo de la cantidad de materia orgánica contenido en el ácido este puede ser marrón claro o negro.
Densidad	1800 kg/m <sup>3</sup> ; 1,8 g/cm <sup>3</sup>
Masa molar	98,08 g/mol
Punto de fusión	283 K (10 °C)
Punto de ebullición	610 K (337 °C)
Punto de inflamación	No tiene
Corrosión	Altamente corrosivo a casi todos los metales con desprendimiento de hidrógeno.
Reactividad	Además de atacar a muchos metales, es un agente fuertemente oxidante y puede causar inflamación en contacto con materiales orgánicos y productos como nitratos y cloratos.
Reacciona	Exotérmicamente con el agua.
Temperatura de ebullición	160 a 332°C dependiendo de su concentración.
Peligrosidad <u>NFPA 704</u>	

### *Aplicaciones del Acido Sulfúrico.*

En variados procesos industriales, es utilizado como agente tratante; es el caso específico de la minería en que es empleado como agente lixivador, para extraer en forma selectiva algunos elementos como Cu, Ni, Fe.

En muchos casos el ácido sulfúrico funge como una materia prima indirecta, y pocas veces aparece en el producto final.

En el caso de la industria de los fertilizantes, la mayor parte del ácido sulfúrico se utiliza en la producción del ácido fosfórico, que a su vez se utiliza para fabricar materiales fertilizantes como el superfosfato triple y los fosfatos de mono y diamonio. Cantidades más pequeñas se utilizan para producir superfosfatos y sulfato de amonio. Alrededor del 60% de la producción total de ácido sulfúrico se utiliza en la manufactura de fertilizantes.

Cantidades substanciales de ácido sulfúrico también se utilizan como medio de reacción en procesos químicos orgánicos y petroquímicos involucrando reacciones como nitraciones, condensaciones y deshidrataciones. En la industria petroquímica se utiliza para la refinación, alquilación y purificación de destilados de crudo.

En el procesado de metales el ácido sulfúrico se utiliza para el tratamiento del acero, cobre, uranio y vanadio, y en la preparación de baños electrolíticos para la purificación y plateado de metales no ferrosos.

Algunos procesos en la industria de la madera y el papel, requieren ácido sulfúrico, así como algunos procesos textiles, fibras químicas y tratamiento de pieles y cuero. (Nothomb, 2007).

### **2.4.3 Producción**

Existen dos procesos principales para la producción de ácido sulfúrico, el método de cámaras de plomo y el proceso de contacto. El proceso de cámaras de plomo es el más antiguo de los dos procesos, y es utilizado

actualmente para producir gran parte del ácido consumido en la fabricación de fertilizantes. Este método produce un ácido relativamente diluido (62%-78% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). El proceso de contacto produce un ácido más puro y concentrado, pero requiere de materias primas más puras y el uso de catalizadores costosos. En ambos procesos el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es oxidado y disuelto en agua. El dióxido de azufre es obtenido mediante la incineración de azufre, tostando piritas (Bisulfuro de Hierro), tostando otros sulfuros no ferrosos, o mediante la combustión de sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) gaseoso. (Nothomb, 2007).

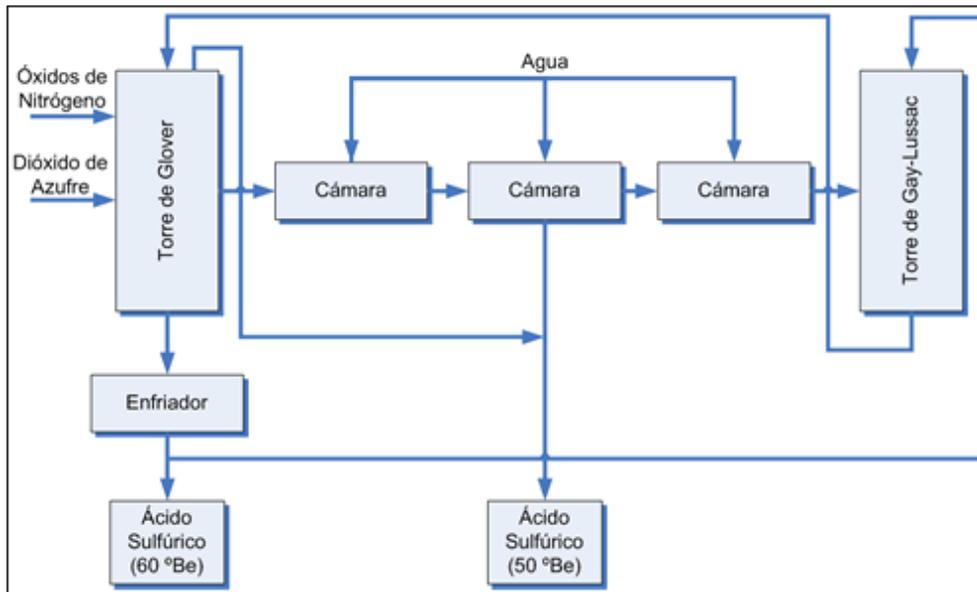
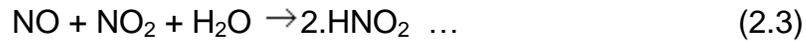
#### *Proceso de Cámaras de Plomo.*

En el proceso de cámaras de plomo (ver figura 2.4), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) gaseoso caliente entra por la parte inferior de un reactor llamado torre de Glover donde es lavado con vitriolo nitroso (ácido sulfúrico con óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) disueltos en él), y mezclado con óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) gaseosos. Parte de dióxido de azufre es oxidado a trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y disuelto en el baño ácido para formar el ácido de torre o ácido de Glover (aproximadamente 78% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).



De la torre de Glover una mezcla de gases (que incluye dióxido y trióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, nitrógeno, oxígeno y vapor) es transferida a una cámara recubierta de plomo donde es tratado con más agua. La cámara puede ser un gran espacio en forma de caja o un recinto con forma de cono truncado. El ácido sulfúrico es formado por una serie compleja de reacciones; se condensa en las paredes y es acumulado en el piso de la cámara. Pueden existir de tres a seis cámaras en serie, donde los gases pasan por cada una de las cámaras en sucesión. El ácido producido en las cámaras, generalmente

llamado ácido de cámara o ácido de fertilizante, contiene de 62% a 68% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .



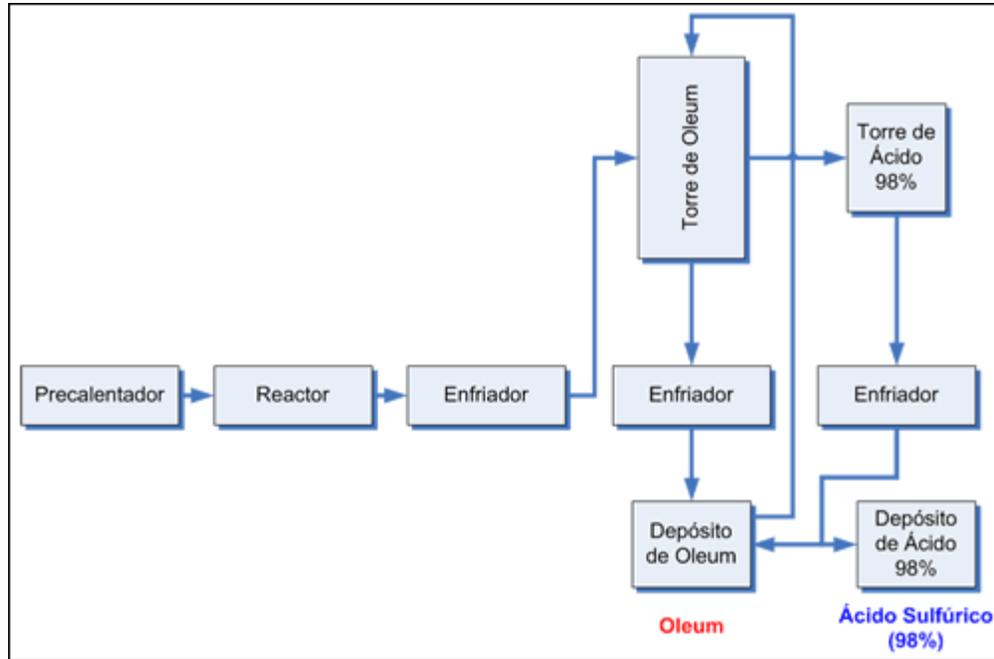
**Figura 2.4** Diagrama del proceso de cámaras de plomo.

(www.textoscientificos.com)

Luego de que los gases pasaron por las cámaras, se los hace pasar a un reactor llamado torre de Gay-Lussac donde son lavados con ácido concentrado enfriado (proveniente de la torre de Glover). Los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre que no hayan reaccionado, se disuelven en el ácido formando el vitriolo nitroso utilizado en la torre de Glover. Los gases remanentes son usualmente liberados en la atmósfera. (Vian, 1999)

#### *Proceso de Contacto.*

El proceso de contacto (ver figura 2.5), se basa en el empleo de un catalizador para convertir el  $\text{SO}_2$  en  $\text{SO}_3$ , del que se obtiene ácido sulfúrico por hidratación.



**Figura 2.5** Diagrama del proceso de contacto.

(www.textoscientificos.com)

En este proceso, una mezcla de gases secos que contiene del 7 al 10% de  $\text{SO}_2$ , según la fuente de producción de  $\text{SO}_2$  (el valor inferior corresponde a plantas que tuestan piritas y el superior a las que queman azufre), y de un 11 a 14% de  $\text{O}_2$ , se precalienta y una vez depurada al máximo, pasa a un convertidor de uno o más lechos catalíticos, por regla general de platino o pentóxido de vanadio, donde se forma el  $\text{SO}_3$ . Se suelen emplear dos o más convertidores.

Los rendimientos de conversión del  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  en una planta en funcionamiento normal oscilan entre el 96 y 97%, pues la eficacia inicial del 98% se reduce con el paso del tiempo. Este efecto de reducciones se ve más acusado en las plantas donde se utilizan piritas de partida con un alto contenido de arsénico, que no se elimina totalmente y acompaña a los gases

que se someten a catálisis, provocando el envenenamiento del catalizador. Por consiguiente, en ocasiones, el rendimiento puede descender hasta alcanzar valores próximos al 95%.

En el segundo convertidor, la temperatura varía entre 500° y 600°C. Esta se selecciona para obtener una constante óptima de equilibrio con una conversión máxima a un coste mínimo. El tiempo de residencia de los gases en el convertidor es aproximadamente de 2-4 segundos.

Los gases procedentes de la catálisis se enfrían a unos 100°C aproximadamente y atraviesan una torre de óleum, para lograr la absorción parcial de  $\text{SO}_3$ . Los gases residuales atraviesan una segunda torre, donde el  $\text{SO}_3$  restante se lava con ácido sulfúrico de 98%. Por último, los gases no absorbidos se descargan a la atmósfera a través de una chimenea.

Existe una marcada diferencia entre la fabricación del  $\text{SO}_2$  por combustión del azufre y por tostación de piritas, sobre todo si son arsenicales. El polvo producido en el proceso de tostación nunca puede eliminarse en su totalidad y, junto con las impurezas, principalmente arsénico y antimonio, influye sensiblemente sobre el rendimiento general de la planta.

La producción de ácido sulfúrico por combustión de azufre elemental, presenta un mejor balance energético pues no tiene que ajustarse a los sistemas de depuración tan rígidos. (Vian, 1999)

#### **2.4.4 Funcionamiento de la Planta**

La descripción del proceso y funcionamiento de la instalación 218 perteneciente a la planta de producción de ácido sulfúrico, se puede observar en el Apéndice A.

# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La metodología del trabajo de grado incluyó principalmente un conjunto de ensayos de materiales e inspecciones que permitieron obtener la información necesaria para cumplir el objetivo propuesto. Además, se realizaron diversas visitas a la planta para conocer y constatar el estado actual, y así plantear una propuesta referente a la condición estructural del equipo en cuestión.

### **3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN**

El proyecto planteado se basa en una investigación transversal, descriptiva, del tipo proyecto factible, debido a que se pretende analizar cómo es y cómo se manifiesta un fenómeno específico, a fin de proponer una solución con posibilidad de ser implantada. (Grajales, 2000).

### **3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

En este caso el estudio trató de establecer la condición operativa del equipo con relación a su componente estructural, así se generaron las recomendaciones pertinentes. Esto se hizo mediante un proceso sistémico con base en la metodología indicada en la figura 3.1.

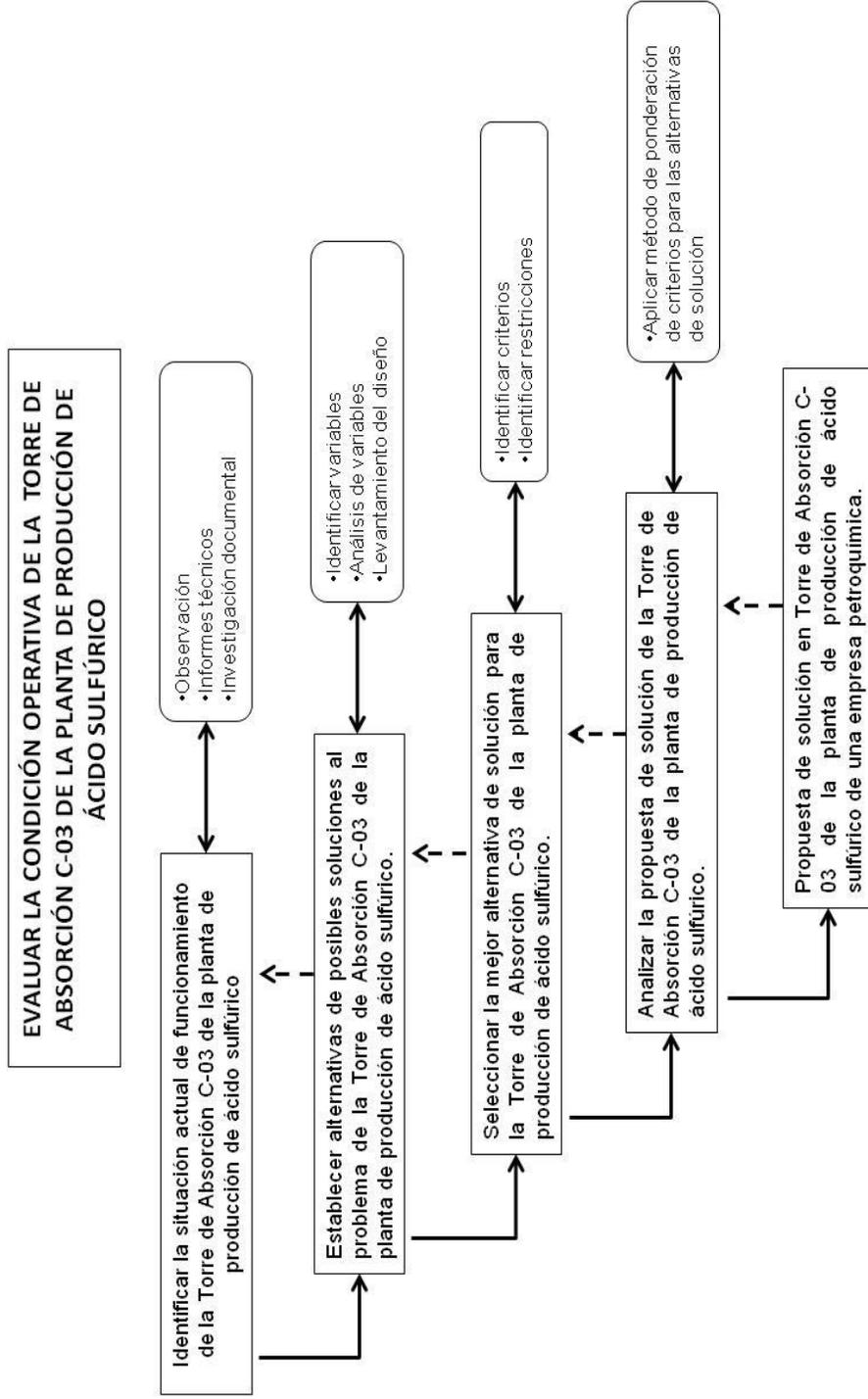


Figura 3.1. Proceso metodológico del estudio.

La figura 3.1 muestra el proceso metodológico aplicado en este estudio. Cada uno de las fases se apoyó en actividades diseñadas específicamente para lograr resultados consistentes con los objetivos propuestos y tendientes a alcanzar una sólida propuesta.

Para determinar la condición funcional del equipo se establecieron entre los parámetros preliminares: relación de espesor del equipo (real sobre diseño), formación de grietas, estado actual de la base estructural, entre otras. Los métodos utilizados se fundamentarán la teoría de inspecciones de fallas de los materiales.

El estudio planteado requiere una serie de pasos para la realización del mismo, esto se debe a que se depende de las condiciones planteadas por el complejo petroquímico Morón.

Se realizaran visitas administrativas con el personal involucrado para constatar la implementación del proyecto y el proceso administrativo requerido para el desarrollo del presente trabajo de grado.

Se realizaran visitas técnicas a los departamentos involucrados para establecer los procedimientos experimentales de los equipos, instrumentos o ensayos de inspección como termografías, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, entre otros. Se destaca que los equipos y los procedimientos son proporcionados por la planta.

### **3.4 DETERMINAR LA CONDICIÓN ACTUAL**

La condición actual se verá reflejada estudiando las diferentes inspecciones realizadas y los datos anteriormente registrados. Basados en ellos se mostrarán ciertos aspectos de acuerdo a su estado actual, la implementación de estos ensayos o inspecciones están regidos bajo normas de utilización.

### **3.4.1 Métodos de inspección**

Los métodos de inspección son de vital importancia para el conocimiento de la condición actual. Comúnmente es usada la observación donde se visualiza el o los elementos de estudio, verificando algún desperfecto a simple vista, muchas veces estos desperfectos no son percibidos de manera simple por el ojo humano, por tanto se hace uso de otros métodos para el reconocimiento de la condición actual, estos pueden ser: líquidos penetrantes, termografía, medición de espesores, entre otros.

### **3.4.2 Datos registrados**

Existen datos ya establecidos en la empresa referente al área a estudiar como lo son: planos de la planta, planos de las estructuras involucradas, entre otros. Así como, teorías del correcto funcionamiento de la planta implicada, estos datos podrán ser comparados con el estado actual de la misma.

### **3.4.3 Reuniones con especialistas**

Los ingenieros especializados en el área son de vital importancia debido a que basados en sus conocimientos en la materia y años de experiencia arrojan datos fundamentales para el conocimiento de la condición actual de la torre a estudiar.

## **3.5 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

De acuerdo con los resultados y datos obtenidos en los ensayos antes mencionados, se procede a analizarlos conjuntamente con especialistas de acuerdo a las condiciones normales establecidos por el fabricante obtenidos en los datos registrados. Luego de estas comparaciones se tendrá una idea clara de la condición técnica actual de la planta específicamente la torre de absorción C-03.

Una de las comparaciones de mayor relevancia que se debe tomar en cuenta es la medición de espesores, en la cual conociendo el espesor óptimo de la planta y el espesor obtenido mediante el ensayo, comparándolos se puede conocer si existen riesgos, los demás ensayos mostrarán características o fallas en diferentes ámbitos como es el caso de los líquidos penetrantes, estos revelarán la existencia de algún tipo de grieta o fisura en el caso que se evidencie alguna, dichas inspecciones mostrarán la justificación para afirmar, en tal sea el caso, como puede afectar el funcionamiento o la confiabilidad de la estructura que posee la torre de absorción C-03.

### **3.6 PROPUESTA DE LA CONDICIÓN FUNCIONAL**

Bajo los estudios realizados se tendrá un claro conocimiento de la condición actual de la planta, específicamente la torre de absorción C-03, de acuerdo con esta condición se propondrán diferentes soluciones bajo conocimientos ingenieril para evitar el daño o la falla que se ha demostrado mediante las inspecciones. Cada una de las propuestas, bajo ponderación de criterios, será estudiada para seleccionar la propuesta más adecuada e idónea, y así solucionar la falla o fallas encontradas.



# CAPÍTULO 4

## *Resultados y Análisis.*

---

---

### **4.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

#### **4.1.1 Antecedentes de la Planta**

La planta de Ácido Sulfúrico (Instalación 218) del Complejo Petroquímico Morón, es un diseño de la empresa KREBS en 1989. Tiene una capacidad de producción de 880 toneladas métricas diarias (800 Toneladas de ácido sulfúrico al 98% y 80 Toneladas de Óleum). La producción se lleva a cabo mediante el proceso de doble-contacto doble-absorción.

#### **4.1.2 Investigación documental**

##### **4.1.2.1 Revisión de planos**

Los planos referentes al proceso implicado son exclusivamente en la planta de producción de ácido sulfúrico, instalación 218, de la torre de absorción C-03, estos se encuentran en el Apéndice C. Hay que tomar en cuenta que en el primer plano encontrado el 218-A-3-00667 tiene defectos en el diseño en la parte superior (mostrando una diferencia de alturas en la

conicidad), siendo esto resuelto en el plano 218-A-00236, donde se muestra la altura coherente de la conicidad superior.

#### **4.1.2.2 Información de procesos**

El proceso a estudiar es en la torre de absorción C-03, y la labor que ésta realiza en la planta de ácido sulfúrico, instalación 218, que es básicamente la absorción final en el proceso, al igual que en la torre de absorción intermedia C-02 se produce un ajuste de concentración, un enfriamiento y una recirculación del ácido. Ver Apéndice A.

#### **4.1.3 Inspecciones técnicas**

##### **4.1.3.1 Observación In Situ**

La empresa Petroquímica Morón, nos permitió realizar visitas guiadas a las instalaciones de la planta, donde nos fue explicado su funcionamiento, las materias primas utilizadas y los riesgos inherentes a la planta.

En la figura 4.1 se puede apreciar una vista de la instalación 218, perteneciente a la planta de producción de ácido sulfúrico del complejo Petroquímico Morón, esta instalación está compuesta por tres (03) torres de absorción, en la cual se lleva a cabo el proceso de absorción de trióxido de azufre con ácido sulfúrico, en cada una de ellas se lleva a cabo una etapa del proceso, en la figura 4.1 se aprecian estas torres, que tienen como nombre según el diagrama de procesos C-01, C-02 y C-03 (indicada por la flecha), esta instalación también cuenta con una cuarta torre (C-04) la cual se encarga de limitar las emisiones de  $\text{SO}_2$  al ambiente y también de concentrar el ácido sulfúrico para la formación de óleum (ácido al 106%), mediante un proceso de recirculación de dicho ácido.

Se puede apreciar que de las torres de absorción, la más afectada por el proceso de corrosión es la torre C-03, es atacada de mayor forma que las otras dos torres de absorción, esto se debe a que ésta cuenta con una chimenea en su parte superior, que al emanar los gases, se tiende a formar una lluvia ácida la cual se adhiere a las paredes de la torre, y con la precipitación de las lluvias este ácido se diluye aumentando su corrosión, afectando de gran manera el exterior de la torre, aunado a esto el Complejo Petroquímico Morón está ubicado en una zona costera, donde el clima y la temperatura afectan de mayor manera las instalaciones debido a la corrosión por el ambiente marino.



**Figura 4.1** Instalación 218.

En la figura 4.2 se puede apreciar la parte superior de la torre de absorción C-03, donde se evidencia que ésta fuertemente atacada por la corrosión.



**Figura 4.2** Parte superior de la torre C-03.

En la figura 4.3 se puede observar un aviso encontrado en la instalación, el cual alerta del riesgo presente en la misma por la corrosión.



**Figura 4.3** Advertencias.

En la figura 4.4, se aprecia la torre de absorción C-03 en su parte inferior, no se tomó una imagen mas cercana por medidas de seguridad, ya que la planta estaba en funcionamiento. Se aprecia en la imagen el faldón de la torre el cual se ve gravemente atacado por la corrosión.



**Figura 4.4** Vista de la parte posterior de la torre C-03

En la figura 4.5 se aprecia como se recubren los instrumentos de medición, como medida de protección, por la corrosión presente en el entorno.



**Figura 4.5** Instrumentos de medición

En la figura 4.6 y 4.7 se aprecia el faldón de soporte de la torre de absorcion C-03, en la vista frontal del faldón (figura 4.6), se aprecia el “manhole” (boca de visita) de acceso a la parte interior, para cualquier inspeccion o ajuste, en la vista lateral del faldón (figura 4.7), se aprecia gran deterioro en el mismo.



**Figura 4.6** Vista frontal del faldón.



**Figura 4.7** Vista lateral del faldón.

En la figura 4.8, se pueden observar los daños tanto en los pernos de sujeción de la torre, como en la base de concreto.



**Figura 4.8** Sistema de Anclajes.

#### **4.1.3.2 Personal Especializado**

Se contó con apoyo de la empresa en cuanto al suministro de informes realizados con anterioridad a la torre, los cuales se pueden encontrar en el Apendice B.

#### **4.1.4 Ensayo no destructivos**

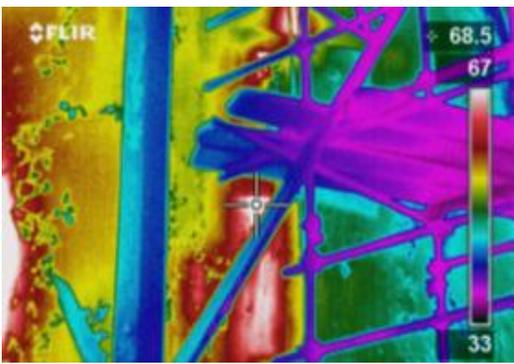
Para un estudio más especializado referente a esta torre es necesaria la implementación de ensayos no destructivos, los cuales muestran detalles o imperfecciones que no pueden ser detectadas a simple vista dando así una base sustancial para así emitir una conclusión específica de la condición actual de la torre.

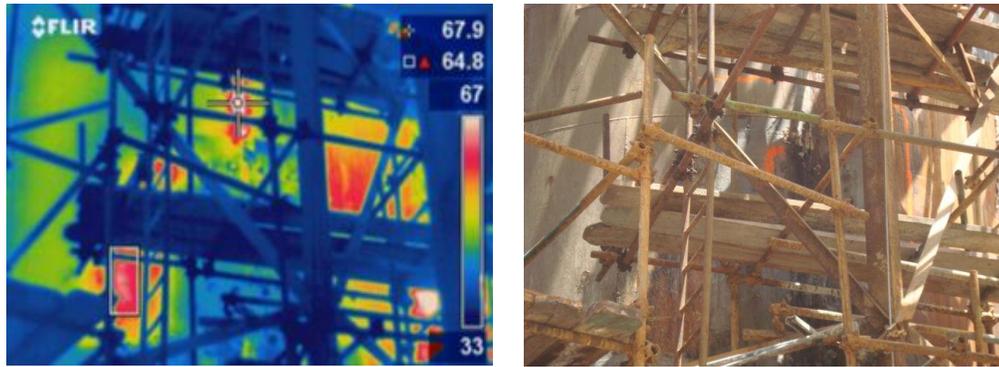
#### 4.1.4.1 Termografía

Tomando en cuenta que la torre C-03 es una zona riesgosa y el empleo de métodos de inspección debe ser lo más versátil posible. Unos de los ensayos no destructivos más usados es la termografía debido a su versatilidad y facilidad de empleo. El estudio de la misma fue empleado bajo la utilización de una cámara termográfica ver anexo A.1 y A.2, en las diferentes zonas de la torre capturando una fotografía y un termograma, estudiando y analizando los resultados obtenidos. El estudio arrojó los siguientes datos:

Se realizó monitoreo termográfico a la pared cilíndrica de la torre de Absorción Final C-03 de la instalación 218. Encontrándose áreas con incremento de irradiación térmica, las cuales son descritas a continuación, en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Descripción de la inspección.

Ubicación	Temperatura máxima (°C)	Área afectada aprox. (m <sup>2</sup> )
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p><b>Figura 4.9</b> Torre de Absorción C-03 (b) Segundo y Tercer Anillo. Sur Oeste.</p>	68.5	1,0m x 3,0m
Lado suroeste, entre el segundo y tercer anillo. Ver figura 4.9.		



**Figura 4.10** Imagen de la Torre de Absorción C-03 en pared cilíndrica lado noroeste, entre segundo y tercer anillo.

<p>Lado noroeste, entre segundo y tercer anillo, específicamente en periferia de zona reparada previamente mediante reemplazo de lámina, reparación del ladrillo y posterior inyección de químico. Ver figura 4.10.</p>	<p>67.9</p>	<p>3,0m x 2,5m</p>
<p><b>Figura 4.11</b> Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra punto caliente en pared lado noreste, a la altura del segundo anillo y cercano a la boquilla de 12”.</p>	<p>61.6</p>	<p>1,5m x 1,2m</p>
<p>Lado noreste, a la altura del segundo anillo, cercano a la boquilla del indicador de nivel. En dicha zona fue inyectado químico sellante recientemente, persistiendo ligeramente el incremento térmico. Ver figura 4.11</p>		



**Figura 4.12** Imagen de la Torre de Absorción C-03 leve fuga de ácido en de forma descendente presente en la pared cilíndrica lado Sureste.

Pared cilíndrica lado Sureste, adyacente a una zona reparada anteriormente. Ver figura 4.12.

79,6

0,3m x 1m

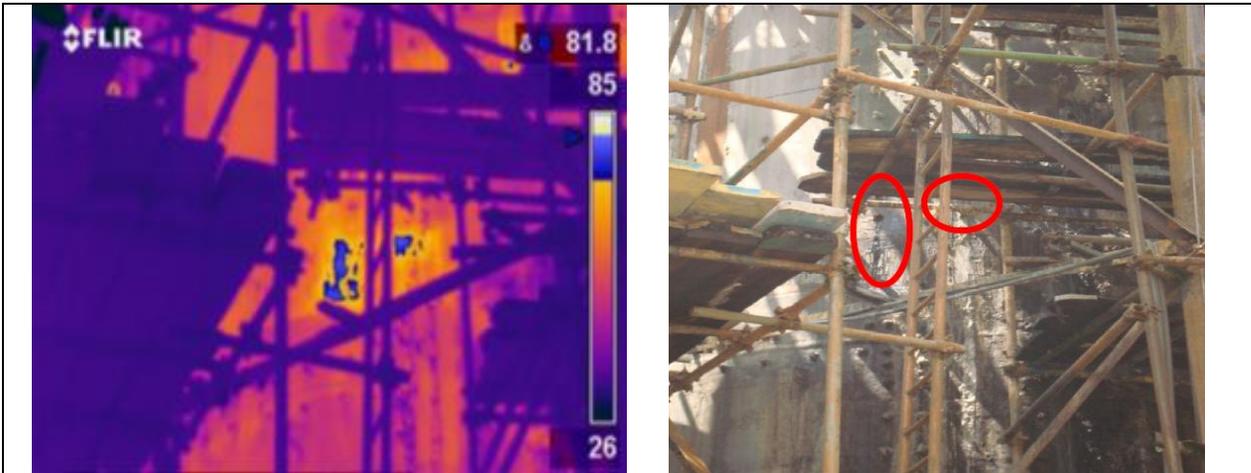


**Figura 4.13** Imagen de la Torre de Absorción C-03 ubicada en la pared cilíndrica lado Noreste.

Pared cilíndrica lado Noreste, adyacente a la boquilla de 12" control de nivel. Ver figura 4.13

75

0,5m x 1m



**Figura 4.14** Imagen de la Torre de Absorción C-03 incremento térmico que se presenta de forma descendente ubicado en la pared cilíndrica lado Noroeste.

Pared cilíndrica lado noroeste, adyacente a múltiples reparaciones. Ver figura 4.14	81,8	1m x 1m
---	------	---------



**Figura 4.15** Imagen de la Torre de Absorción C-03 incremento térmico que se presenta de forma puntual ubicado en la pared cilíndrica lado Oeste específicamente en el segundo anillo.

Pared cilíndrica lado Oeste específicamente en el segundo anillo contado de abajo hacia arriba. Ver figura 4.15	73,7	0,5m x 0,5m
---	------	-------------



**Figura 4.16** Imagen de la Torre de Absorción C-03 incremento de irradiación térmica adyacente a una zona reparada anteriormente.

Pared cilíndrica lado Suroeste entre el tercer y cuarto anillo cilíndrico contado de abajo hacia arriba. Ver figura 4.16.

85,4

2m x 0,5m



**Figura 4.17** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra punto caliente en periferia de la boquilla N6.

Periferia de la boquilla de 12" (N6), de venteo de la bomba PC-06A/B/C, lado este, a la altura del primer. Ver figura 4.17

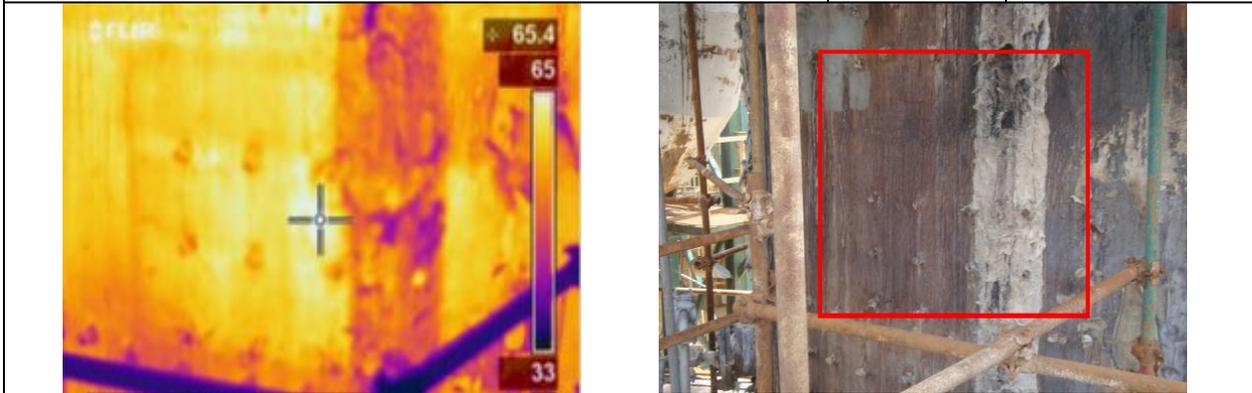
65.8

0,7m x 1,2m



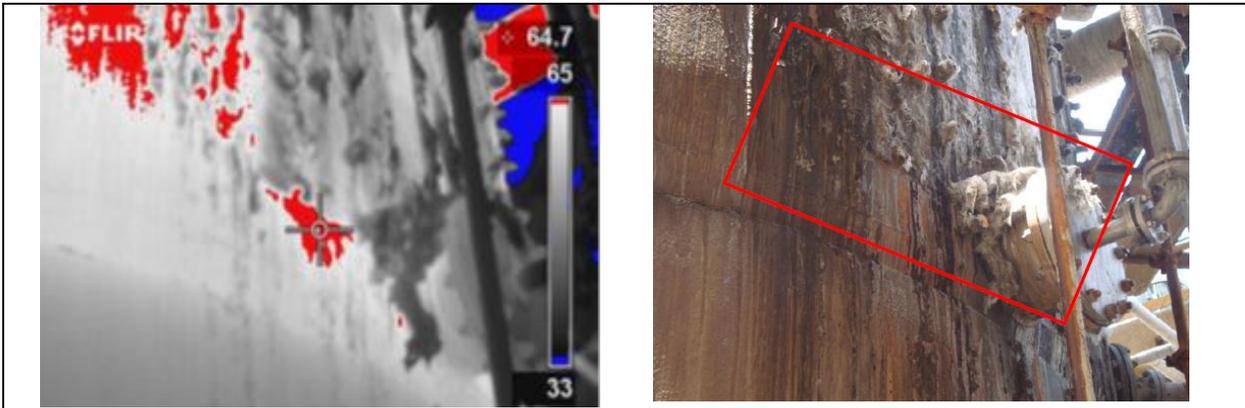
**Figura 4.18** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra distribución térmica en pared cilíndrica de la torre, lado sureste, entre segundo y tercer anillo.

<p>Pared cilíndrica de la torre, lado sureste, entre segundo y tercer anillo. Es importante resaltar que en la periferia del punto caliente, existe un gran área reparada, por lo tanto existe la posibilidad de que el ladrillo antiácido se encuentre deteriorado en dicha zona y no es posible detectarlo mediante esta técnica por la presencia del químico sellante, por tanto,. Ver figura 4.18</p>	<p>68.5</p>	<p>1.5m x 1.5m</p>
---	-------------	--------------------



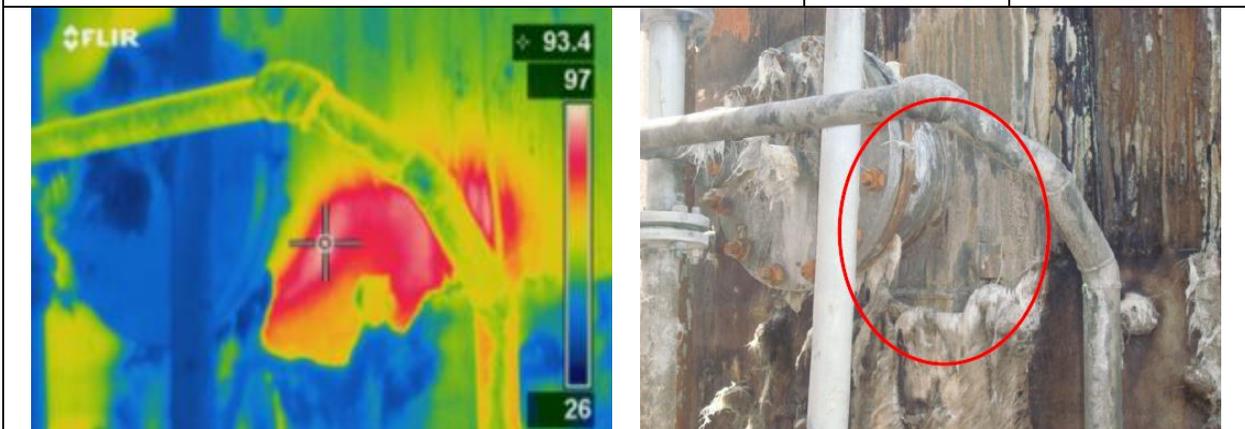
**Figura 4.19** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra punto caliente en pared lado sur, a la altura del segundo anillo.

<p>Pared lado sur, a la altura del segundo anillo Ver figura 4.19.</p>	<p>65.4</p>	<p>1.5m x 1.5m</p>
--	-------------	--------------------



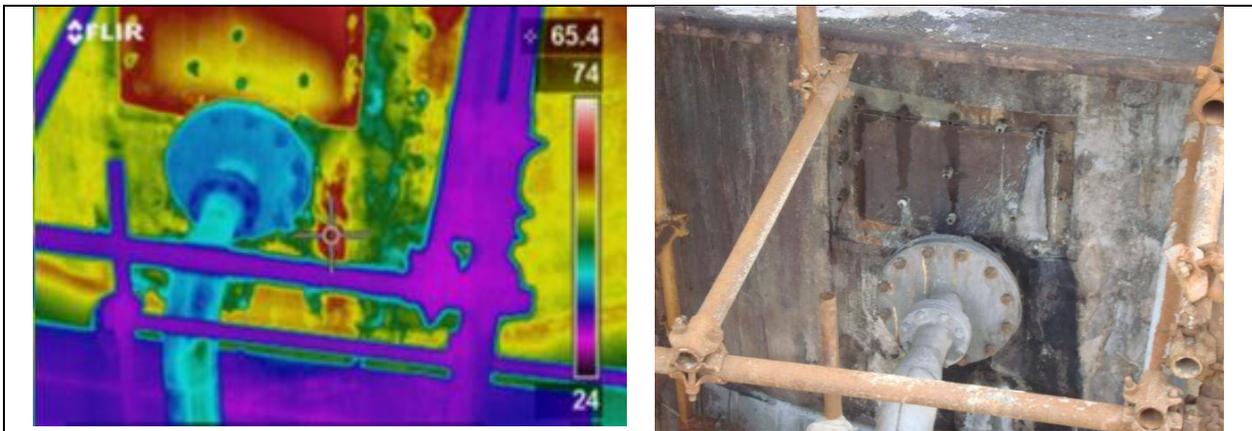
**Figura 4.20** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra punto caliente en periferia de la boquilla de 12”.

Periferia de la boquilla de 12” (N12B), de entrada de agua para ajuste de concentración, lado sur, a la altura del primer anillo. Ver figura 4.20.	64.7	2.0m x 1.5m
--	------	-------------



**Figura 4.21** Imagen de la Torre de Absorción C-03 que muestra incremento de irradiación en periferia de la boquilla de 12” (N7), de retorno del medidor de concentración, ubicado en lado sur.

Periferia de la boquilla de 12” (N7), de retorno del medidor de concentración, ubicado en lado sur, a la altura del segundo anillo. Ver imagen 4.21.	93.4	1.2m x 1.0m
--	------	-------------



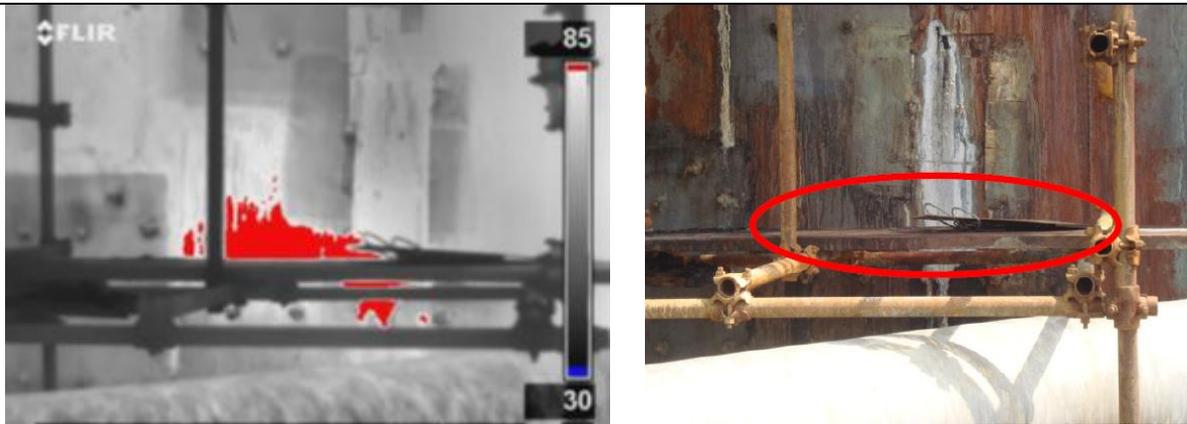
**Figura 4.22** Imagen de la Torre de Absorción C-03 que muestra punto caliente en periferia de la boquilla de 12” (N5), de entrada de ácido a la torre, lado sureste.

De entrada de ácido a la torre, lado sureste. Ver figura 4.22.	65.4	2m x 2m
--	------	---------



**Figura 4.23** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra incremento térmico en forma de cascada encontrado en el cuerpo cilíndrico lado Suroeste.

Pared cilíndrica Sureste; adyacente entre las dos boquillas inferiores, ver figura 4.23	83°C	2m x 1.5m
---	------	-----------



**Figura 4.24** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra incremento térmico en forma horizontal en el cuerpo cilíndrico lado Sureste de la torre.

Cuerpo cilíndrico lado Sureste de la torre, cuarto anillo contando de abajo hacia arriba, incremento de forma horizontal. Ver figura 4.24

90°C

1.5m x 1.5m



**Figura 4.25** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra incremento térmico encontrado en la adyacencia lado Sureste de la boquilla inferior en la pared cilíndrica lado Sur.

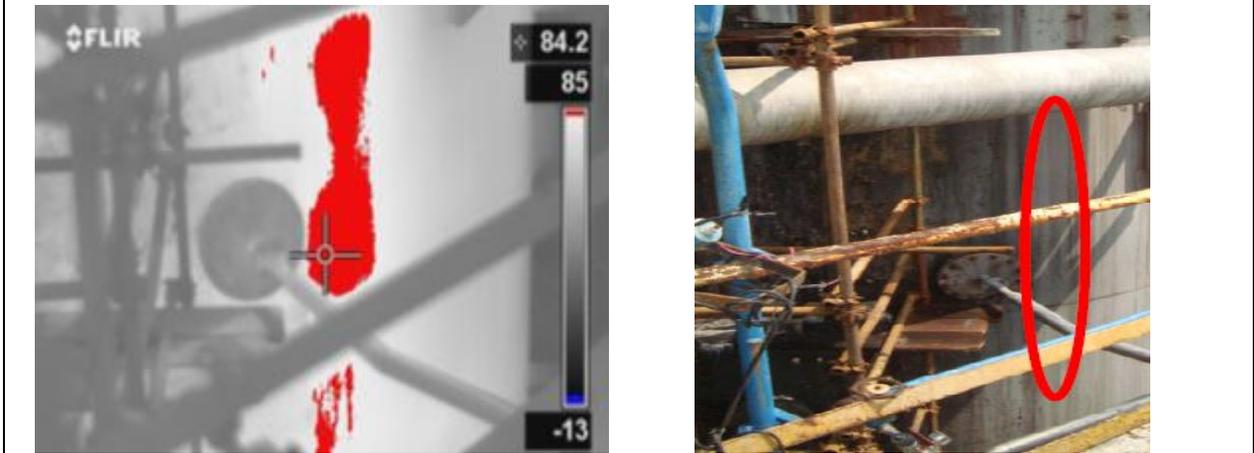
Adyacencia lado Sureste de la boquilla inferior de 12" en la pared cilíndrica lado Sur. Ver figura 4.25

87°C

0.5 mx0.5m.

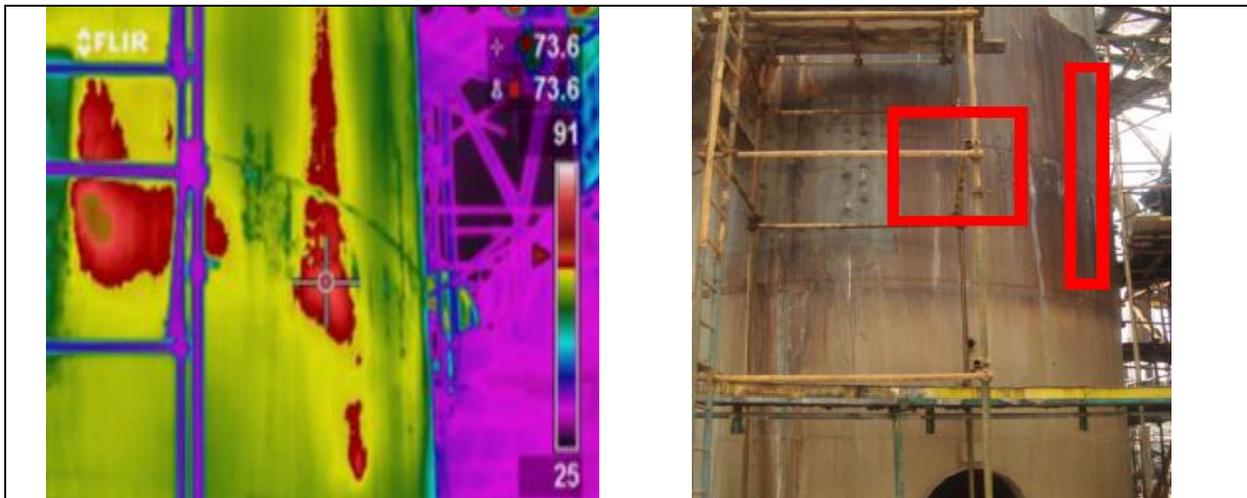


**Figura 4.26** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra incremento térmico en forma vertical descendiente ubicado en la pared cilíndrica lado Este parte superior.



**Figura 4.27** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra incremento térmico en forma vertical descendiente ubicado en la pared cilíndrica lado Este, dicho incremento se extiende hasta la parte inferior.

Pared cilíndrica lado Sureste, adyacente a la boquilla inferior de 12" (N6). Ver figura 4.26 y 4.27.	91°C	4m x 1m
--	------	---------



**Figura 4.28** Imagen de la Torre de Absorción C-03 muestra incremento de irradiación térmica encontrado en la pared cilíndrica lado Oeste.

Pared cilíndrica lado Oeste adyacente a una anterior. Ver figura 4.28.	74°C	2,5 m x 1m
---	------	------------

Se realizó monitoreo termográfico a la pared cilíndrica de la torre C-03 encontrando las siguientes condiciones resaltantes:

En la pared cilíndrica lado Norte:

- Se observó una pequeña zona con incremento de irradiación térmica adyacente a una zona reparada anteriormente ubicada en la pared cilíndrica lado Noreste, obteniendo valores superiores a los 76,5°C. Ver figura 4.10.
- La segunda zona que presenta incremento térmico que se presenta de forma descendente ubicado en la pared cilíndrica lado Noroeste, adyacente a unas antiguas reparaciones, obteniendo un valor máximo de temperatura de 81,8°C. Ver figura 4.11.
- Se observó un incremento térmico que se presenta de forma puntual ubicado en la pared cilíndrica lado Oeste específicamente en el segundo anillo contado

de abajo hacia arriba, obteniendo un valor máximo superior a 73,7°C. Ver figura 4.12.

En la pared cilíndrica lado Sur:

- Se observó una zona de forma descendente con incremento térmico y leve fuga de ácido de forma descendente presente en la pared cilíndrica lado Sureste, adyacente a una zona reparada anteriormente, obteniendo unos valores máximos superiores a los 79,6°C. Ver figura 4.9.
- Se observó un área con incremento térmico en forma descendente ubicado en la pared cilíndrica lado Suroeste entre el tercer y cuarto anillo cilíndrico contado de abajo hacia arriba; encontrando valores de irradiación térmica superiores a los 85,4°C. Ver figura 4.13.
- Se observó un incremento térmico en forma de cascada encontrado en el cuerpo cilíndrico lado Suroeste; específicamente entre las dos boquillas inferiores, este incremento alcanza un valor máximo de 83°C (área de color rojo) Ver figura 4.23.
- Se observó una zona con incremento de irradiación térmica en forma horizontal ubicada en la adyacencia de la reparación en forma rectangular parte superior aproximadamente en el quinto anillo contado de abajo hacia arriba lado Sur de la torre, obteniendo un valor superior a los 90°C. Ver figura 4.24.
- Se observó un incremento térmico encontrado en la adyacencia lado Sureste de la boquilla inferior en la pared cilíndrica lado Sur, obteniendo un valores máximos superiores a los 87°C. Ver figura 4.25.

En la pared cilíndrica lado Este:

- Se observó un incremento térmico en forma vertical descendente ubicado en la pared cilíndrica lado Este parte superior, adyacente a una

antigua reparación, obteniendo un valor máximo superior a 91,7°C. Ver figura 4.26

- Se observó un incremento térmico en forma vertical descendiente ubicado en la pared cilíndrica lado Este, dicho incremento se extiende hasta la parte inferior, específicamente hasta el nivel de la boquilla inferior alcanzando valores de irradiación térmica superiores a los 85°C, definido en el termograma en color rojo. Ver figura 4.27.

En la pared cilíndrica lado Oeste:

- Se observó un incremento de irradiación térmica encontrado en la pared cilíndrica lado Oeste adyacente a una anterior reparación, este incremento se desplaza en forma horizontal hacia el Sur alcanzando valores superiores a los 74°C. Ver figura 4.28.

Existen niveles altos de temperatura que son causados por el deterioro de los ladrillos antiácidos ubicados en la parte interna y en algunos casos desprendimientos de los mismos.

#### **4.1.4.2 Medición de espesores**

En la realización de esta inspección se requiere de los instrumentos mencionados en el capítulo II, en el punto 2.3.3.1.1 (ver anexo A.3) y el personal especializado para el empleo de los mismo. Este instrumento posee una punta tipo dual que emite una sola señal y recibí una sola señal consecuencia de la que fue emitida (ver anexo A.4), el contacto de esta punta no es directamente con el elemento de estudio, para este contacto se usa un compuesto intermedio como grasa o silicón, si es en altas temperaturas.

Se realizó primeramente una inspección visual, observándose las siguientes condiciones:

- Parchos soldados a tope y a solape producto de reparaciones anteriores en el 30% de su superficie.

- Picaduras dispersas en toda la superficie de hasta 1.5mm de profundidad.
- Cordones de soldaduras inconclusos en puntos localizados.
- Indicios de fuga en forma de sulfato en cinco (5) puntos de la soldadura de sellado de los parchos instalados a solape y a tope en la parte intermedia, lado nor-oeste de la carcasa de la torre, debido al agrietamiento que se presenta. Ver fotos anexas en anexo A.5.
- Se aprecia fuga por la soldadura de unión de la manga ubicada en el lado sur-este de la carcasa de la torre, específicamente por el abombamiento de la resina adherida sobre esa superficie. Ver foto anexa en anexo A.6.

De acuerdo con estas observaciones se procede a realizar un monitoreo de mediciones de espesores alrededor de los dos (2) parchos instalados a solape, en el lado oeste de la carcasa de la fuga, debido a fugas que se presentaron y que se apreciaron por la remoción de la resina que se encontraban adheridas en toda su superficie, dando las siguientes mediciones:

**Tabla 4.2** Resultados de medición de espesor.

Parcho de estudio (cm <sup>2</sup> )	Mediciones (mm)								
	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7	Nº8	Nº9
25cm X 25cm	6,4	4,7	5,7	5,2	4,4	10,5	11,1	11,4	11,0
20cm X 20cm	7,0	8,7	9,5	9,5	5,5	5,2	-	-	-



**Figura 4.29** Imagen torre absorción C-03 de medición de espesores mostrando valores obtenidos.

El espesor nominal de esa sección de la carcaza es de 11 mm sin tomar el espesor de 0,5 mm de los parches. Se puede apreciar que existe una reducción de espesor del más de 50%, lo que indica la existencia de ataque químico por daños del refractario interno. Esto se observa en los bajos espesores al momento de realizar el monitoreo alrededor de las dos (2) láminas instaladas a solape ubicadas en el lado oeste donde se presentaron las fugas de ácido, las cuales se midieron donde se removió la resina adherida en esa sección de la carcaza, los puntos más oscuros es grasa que es usada para el apoyo de la punta del instrumento.

Al momento de la inspección en la cúpula superior, se midieron espesores obteniéndose los siguientes resultados:

Espesor Máximo: 11mm.



**Figura 4.30** Imagen torre absorción C-03 de medición de espesores mostrando valores obtenidos ubicados en la cúpula superior.

El espesor Nominal del cuerpo de la torre mencionado anteriormente incluyendo también la cúpula es de 11mm. Observando los resultados, espesores bajos 7mm siendo, crítico para la estabilidad de la torre y seguridad del personal e instalaciones cercanas a dicha planta.

#### 4.1.4.3 Líquidos penetrantes

Esta inspección muestra principalmente fisuras, fugas, aberturas, entre otros. Que por lo general no pueden ser definidas a totalidad bajo la percepción del ojo humano. En el complejo Petroquímico-Morón la implementación de este sistema viene dado bajo tres componentes, los cuales son:

- Limpiador o removedor: se basa principalmente en la limpieza de la zona a estudiar, removiendo todo tipo de impurezas, aceite, grasa, sucios adheridos, virutas, entre otros. Siendo necesario la limpieza total de la superficie para el empleo del siguiente componente. Este limpiador puede variar, puede ser agua o algún otro solvente, para este caso es usado Cleaner/Remover (ver figura A.7).

- Penétrante: al ser rociado debe introducirse en las zonas irregulares de la superficie, (ver figura A.8).
- Revelador: es el último compuesto a utilizar y se encarga de proporcionar una tonalidad clara a la superficie de manera que la coloración del penetrante sea observada con mayor facilidad. Ver figura A.9.

Para el estudio del ensayo de líquido penetrante se realizó un ensayo a una probeta, para así conocer a cabalidad el empleo del mismo. La pieza a estudiar es rociada con el primer componente limpiador o removedor, esto se realiza para quitar residuos de grasa o algún óxido removible. Luego se aplica el penetrante, el cual deja una coloración rojiza, (Ver figura A.10).

Al pasar 10 min, que es el tiempo estimado para ese tipo de metal, se procede a una nueva aplicación de limpiador removedor de manera de quitar el exceso de penetrante en la superficie. (Ver figura A.11).

Una vez limpia toda la superficie se implementa el uso del revelador, para el cual se debe esperar un tiempo estimado de secado de 3 min. (Ver figura A.12).

Se observa una coloración blanca que muestra claramente los detalles rojizos, los cuales indican los desperfectos en la superficie, para este caso muestra un orificio en su parte inferior. Este estudio genera una idea clara de la utilización de líquidos penetrantes, luego de entrevistas con el personal especializado, se muestra que la utilización de este método, en el complejo Petroquímica, es principalmente para soldaduras debido a lo específico del mismo, por lo cual no es empleado en la torre de absorción C-03, y aun así los métodos anteriores mostraron la situación actual de la misma.

#### 4.1.5 Cálculos estructurales

En esta sección se procederá al cálculo del peso de la Torre de absorción C-03, este se hizo en su condición operativa lo cual quiere decir, que se tomará en cuenta el peso estructural de la torre y el peso del ácido sulfúrico en el proceso. Al obtener el peso de la torre será utilizado para el análisis de esfuerzos y espesores.

Para el siguiente cálculo, se tomará en cuenta el peso del material del cual está fabricada la torre, en ella existen distintos tipos de aceros, consta de anillos de acero al carbono, acero inoxidable y de una aleación conocida como Zecor, se tomó en cuenta las paredes de ladrillo antiácido internas que protegen la torre, los arcos de soportes que también están formados por ladrillos antiácidos, las sillas cerámicas (Intalox) ubicadas en su parte superior y el peso producido por el ácido sulfúrico contenido en ella.

$$P_{TOT} = P_{H_2SO_4} + P_{lad} + P_{Zecor} + P_{ace} + P_{sillas}$$

$P_{TOT}$ : Peso total de la torre.

$P_{H_2SO_4}$ : Peso del ácido sulfúrico.

$P_{lad}$ : Peso de los ladrillos antiácidos.

$P_{Zecor}$ : Peso de la aleación Zecor.

$P_{ace}$ : Peso del acero al carbono.

$P_{sillas}$ : Peso de las sillas cerámicas.

#### Peso del Ácido Sulfúrico

Para obtener este peso, se calculó el volumen de ácido contenido en la torre y luego con la densidad del ácido sulfúrico al 98% (ácido producido en el Complejo Petroquímico), se determinará su peso.

En la zona donde se encuentra el ácido, existe una capa de ladrillos antiácidos que protege las paredes de la torre, en este caso al diámetro de la torre se restó dos veces el espesor de los ladrillos, para obtener el diámetro de la zona con ácido ( $\phi_{Acid}$ ).

$$\phi_{torre} = 5791 \text{ mm}$$

La pared de ladrillos que reviste la torre, está formada, primeramente por una capa de teflón, una capa de silicato de potasio y tres capas de ladrillos antiácidos, como se muestra en la figura 4.31, se puede ver que el espesor total de toda la protección es 118 mm.

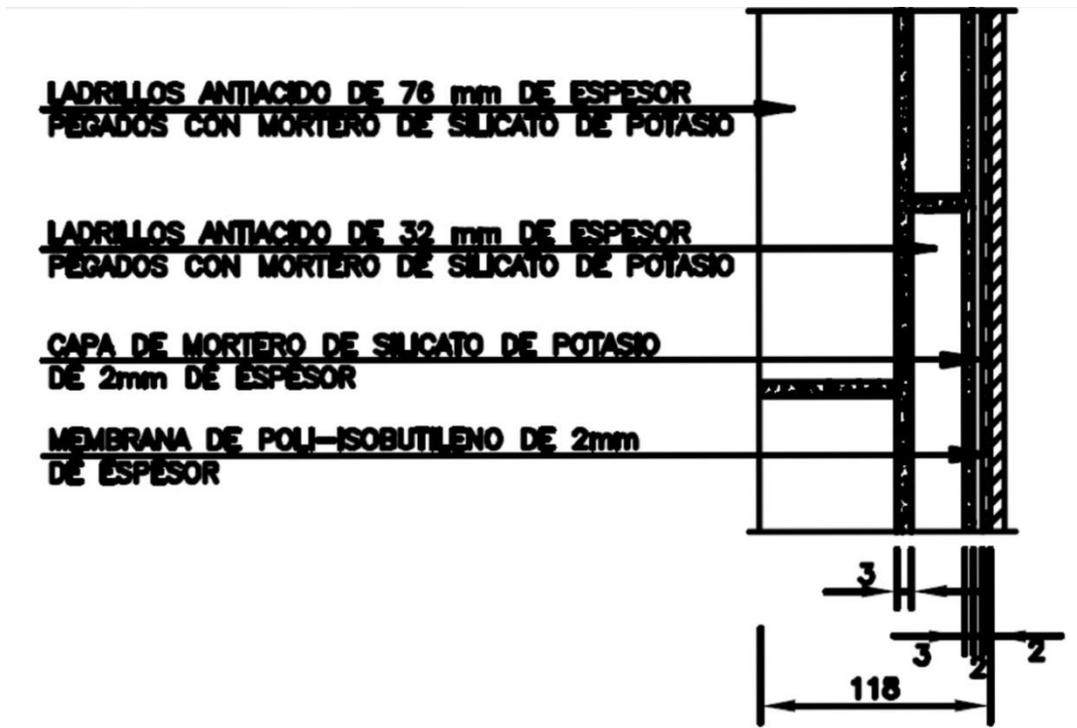


Figura 4.31 Espesor de capa protectora obtenida en el plano.

Por lo que:

$$e_{ladrillos} = 118 \text{ mm}$$

$$\phi_{Acid} = \phi_{torre} - (2 * e_{ladrillos}) = 5791 \text{ mm} - (2 * 118) = 5555 \text{ mm}$$

La altura del nivel del ácido se puede apreciar en el plano del proceso (ver figura 4.32), para este cálculo se tomará un cilindro completo, a favor de la seguridad.



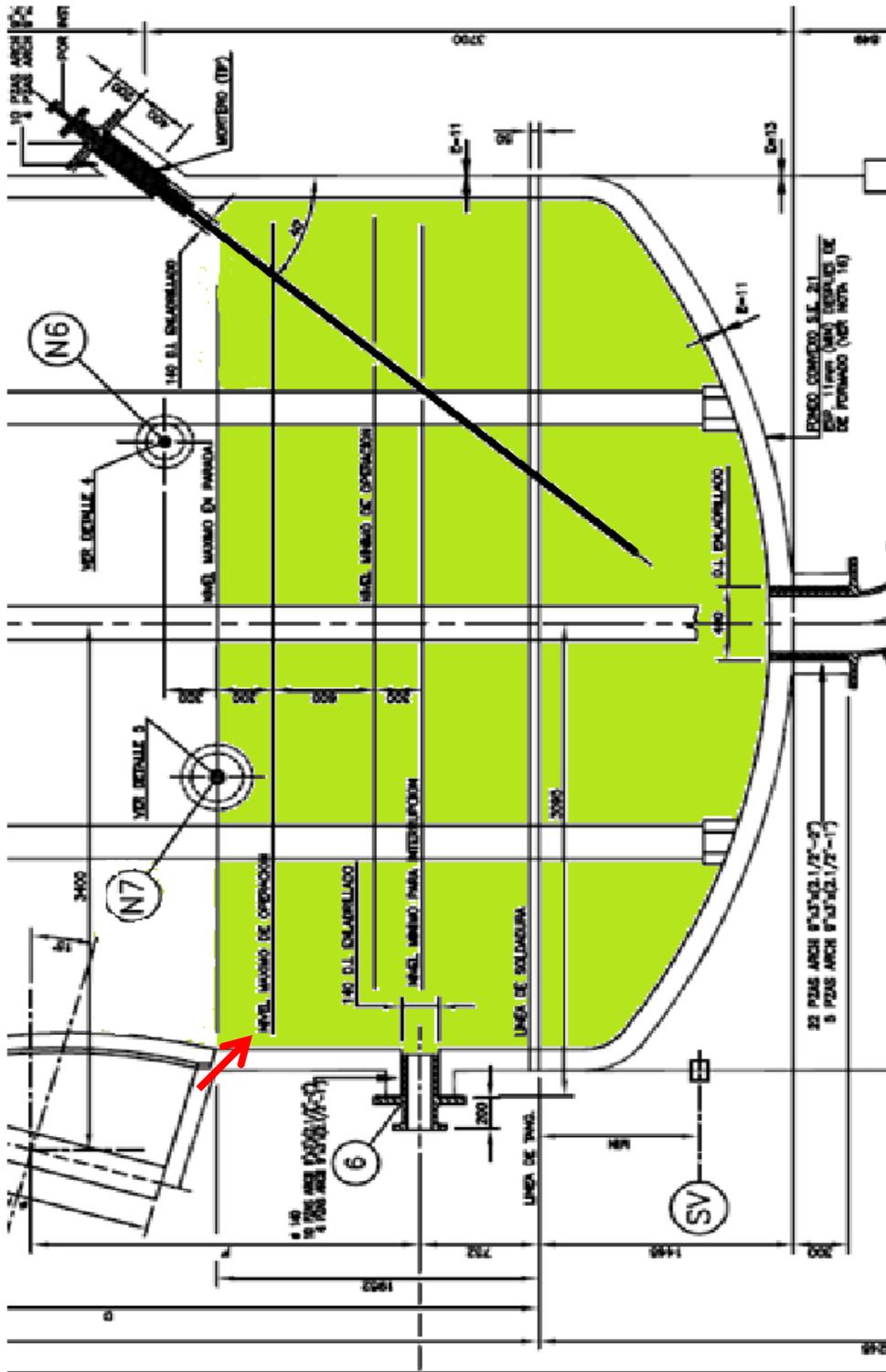


Figura 4.32 Nivel de ácido en el tanque.



### Nivel de Ácido

$$h_{acid} = 300 \text{ mm} + 600 \text{ mm} + 732 \text{ mm} + 1148 \text{ mm} = 2780 \text{ mm}$$

### Cálculo del volumen

#### Volumen de un cilindro

$$V = \frac{\pi}{4} * \phi^2 * h = \pi * r^2 * h$$

$$V_{acid} = \frac{\pi}{4} * \phi_{acid}^2 * h_{acid} = \frac{\pi}{4} * (55,55 \text{ dm})^2 * (27,80 \text{ dm}) = 67375,57 \text{ dm}^3$$

$$V_{acid} = 67375,57 \text{ L}$$

Conversión  $1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L}$

### Cálculo del peso

La densidad del ácido sulfúrico trabajado en el Complejo Petroquímico Morón (ácido al 98%) es de 1,84 kg/L

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow m = \rho * v$$

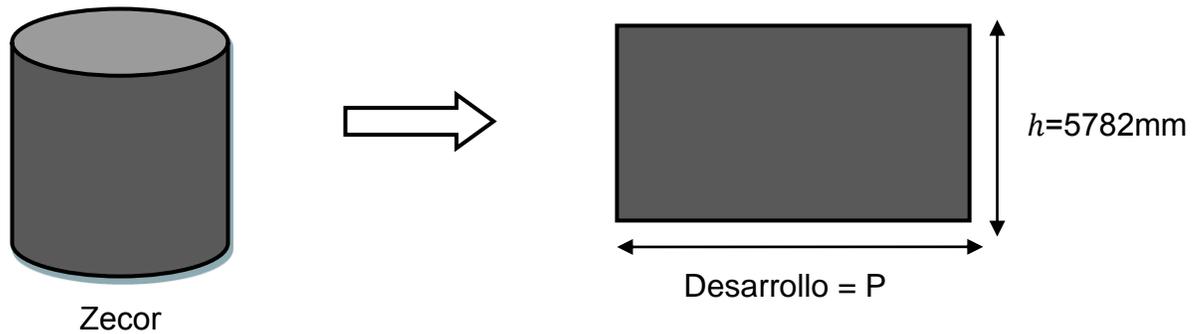
$$m_{aci} = 1,84 \frac{\text{Kg}}{\text{L}} * 67375,57 \text{ L} = 123971,04 \text{ Kg} \cong 124 \text{ Ton}$$

### Peso de la aleación Zecor

La torre de absorción C-03 consta en su parte superior de tres anillos de una aleación conocida como Zecor, la cual es altamente resistente a la corrosión.

Estos van desde su parte intermedia, hasta la parte superior de la misma, el material tiene un espesor de 8 mm.

Se procedió a calcular el perímetro de la sección de Zecor, para luego calcular el volumen del material y poder con éste conocer su peso. (Ver figura 4.33)



**Figura 4.33** Perímetro Zecor.

Calculando el perímetro

$$P = 2 * \pi * r = \pi * D = \pi * (5,791 m) = 18,193 m$$

Cálculo de volumen

$$V = b * h * e = 18,193 m * 5,780 m * 8 mm = 841,24 dm^3$$

Se necesita conocer la densidad de la aleación Zecor, esta se calculó a partir de las dimensiones y el peso de una lámina de Zecor, esto se pudo encontrar en el certificado de calidad del material, emitido al momento de la compra, éste se encuentra en el Apéndice D.

Lámina de Zecor

$$\begin{aligned} & \text{Volumen} \\ & 72" \times 240" \times 0,315" \\ & (72 * 25,4) * (240 * 25,4) * (0,315 * 25,4) \\ & 1828,8mm * 6096mm * 8,001mm \\ & 1,828m * 6,096m * 8,001mm \\ & 89,19dm^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Masa} \\ & 1592 \text{ lb} \\ & (1592 * 0,453) \\ & 721,176 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{721,176 \text{ Kg}}{89,19 \text{ dm}^3} = 8,08 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

Conversiones:

$$1 \text{ lb} = 0,453 \text{ Kg}$$

$$1 \text{ pulg} = 25,4 \text{ mm}$$

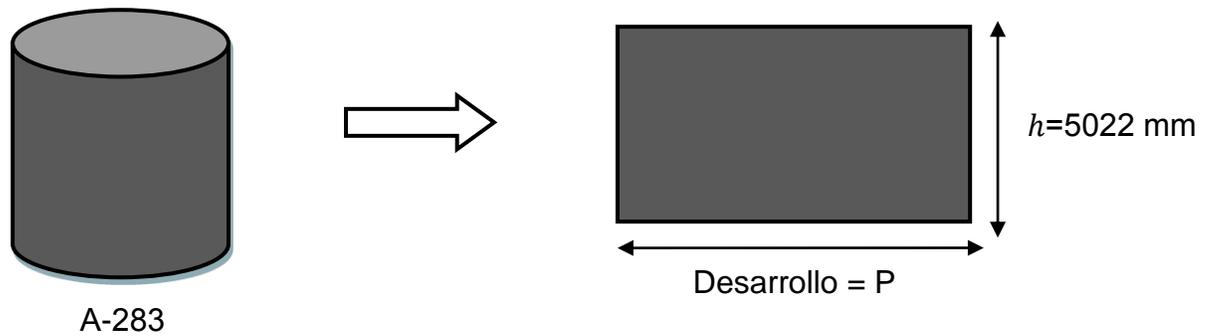
$$M_{Zecor} = \rho * v = 8,08 \frac{\text{Kg}}{\text{L}} * 841,24 \text{ L} = 6797,21 \text{ Kg} \cong 6,8 \text{ Ton}$$

Peso del Acero Carbono

La torre desde su parte media, hasta la parte inferior donde se encuentra el cabezal, está fabricada de acero A-283 de un espesor de 11mm, se calculó el peso de este material en dos partes, primero la parte cilíndrica de la torre y luego el cabezal que tiene forma de casquete esférico.

$$P_{ace} = P_{casq} + P_{cil}$$

Para calcular el peso del cilindro de acero, se procederá a calcular el perímetro de la sección, para luego calcular el volumen del material y poder con este conocer su peso. (Ver figura 4.34)



**Figura 4.34** Perímetro Acero al Carbono.

Calculo el perímetro

$$P = 2 * \pi * r = \pi * D = \pi * (5,791m) = 18,193 m$$

Cálculo de volumen de acero

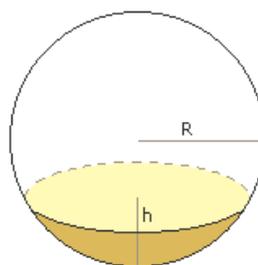
$$V = b * h * e = 18,193 m * 5,022 m * 11 mm = 1005,01 dm^3$$

La densidad de este tipo de acero es  $7,85 \frac{Kg}{dm^3} = 7,85 \frac{Kg}{L}$

$$M_{cil} = \rho * v = 7,85 \frac{Kg}{L} * 1005,01L = 7889,32Kg \cong 7,9 Ton$$

Para calcular el peso del material del cabezal, se calculará el área mediante la ecuación de un casquete esférico, (ver figura 4.35) luego teniendo el área, se conseguirá el volumen de acero del casquete mediante el espesor, y se procederá a calcular el peso.

Casquete esférico



$$A = 2\pi Rh$$

**Figura 4.35** Área de un casquete esférico.

$$A_{casq} = 2 * \pi * R * h = 2 * \pi * 4,55 \text{ m} * 1,448 \text{ m} = 41,396 \text{ m}^2$$

$$V_{casq} = A_{casq} * \text{espesor} = 41,396 \text{ m}^2 * 11 \text{ mm} = 455,36 \text{ dm}^3$$

La densidad de este tipo de acero es  $7,85 \frac{\text{Kg}}{\text{dm}^3} = 7,85 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$

$$M_{casq} = \rho * v = 7,85 \frac{\text{Kg}}{\text{L}} * 455,35 \text{ L} = 3574,49 \text{ Kg} \cong 3,6 \text{ Ton}$$

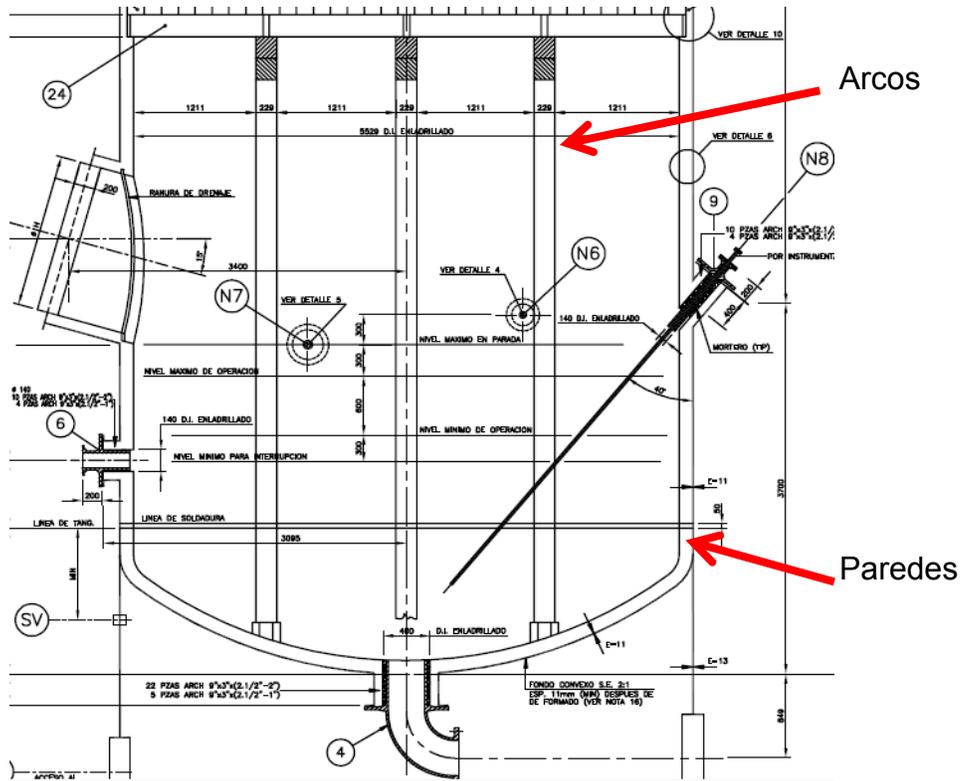
Con el peso del casquete y el cilindro se podrá calcular el peso total del acero A-283

$$P_{ace} = P_{casq} + P_{cil} = 3,6 \text{ ton} + 7,9 \text{ ton} = 11,5 \text{ Ton}$$

#### Peso de los Ladrillos Antiácidos

Para determinar este, se tomará en cuenta el peso de los ladrillos de los arcos de soporte y el peso de los ladrillos del revestimiento en las paredes. Ver figura 4.36.

$$P_{lad} = P_{reves} + P_{arcos}$$



**Figura 4.36** Vista de los arcos y paredes de ladrillos antiácidos

Para calcular el peso de los ladrillos en las paredes, se toma en cuenta el área del casquete y del cilindro, pues estos ladrillos de revestimiento van desde la parte inferior del cabezal, hasta casi la mitad de la torre, están en toda la zona que contiene ácido sulfúrico.

$$A_{casq} = 2 * \pi * R * h = \pi * 4,55 m * 1,488 m = 20,698 m^2$$

$$A_{cil} = \pi * D * h = \pi * 5,791 m * 4,709 m = 85,670 m^2$$

$$A_{tot} = A_{casq} + A_{cil} = 20,698 m^2 + 85,670 m^2 = 106,368 m^2$$

$$V_{ladrillos} = A_{tot} * espesor = 106,368 m^2 * 118 mm = 12551,424 dm^3$$

$$\rho_{ladrillos\ antiacidos} = 2,25 \frac{Kg}{dm^3} = 2,25 \frac{Kg}{L}$$

$$M_{lad\ rev} = \rho * v = 2,25 \frac{kg}{L} * 12551,424 L = 28240,704 Kg \cong 28,3 Ton$$

Para el cálculo de los arcos de soporte, se puede apreciar en el plano que el número total de ladrillos que los componen son 2860 unid. Se obtendrá el peso de un ladrillo y luego se multiplicará por las unidades.

$$M_{ladrillo} = \rho_{ladrillos\ antiacidos} * V_{ladrillo}$$

$$\rho_{ladrillos\ antiacidos} = 2,25 \frac{Kg}{dm^3} = 2,25 \frac{Kg}{L}$$

Se obtendrá el volumen de un ladrillo, a partir de sus dimensiones.

$$V_{ladrillo} = 9" * 3" * 2\frac{1}{2}"$$

$$V_{ladrillo} = (9 * 25,4) * (3 * 25,4) * (2,5 * 25,4)$$

$$V_{ladrillo} = (228,6\ mm) * (76,2\ mm)(63,5\ mm)$$

$$V_{ladrillo} = (0,228\ m) * (0,076\ m)(63,5\ mm)$$

$$V_{ladrillo} = 1,100\ dm^3 = 1,100\ L$$

$$M_{ladrillo} = 2,25 \frac{Kg}{L} * 1,100\ L = 2,475\ Kg$$

$$M_{Arc\ lad} = unid * M_{ladrillo} = 2860 * 2,475\ Kg = 7078,5\ Kg \cong 7\ Ton$$

$$P_{lad} = P_{reves} + P_{arcos} = 28,3\ Ton + 7\ Ton = 35,3\ Ton$$

### Peso de Sillas Cerámicas

En el plano del proceso se aprecian las sillas cerámicas (Intalox) de tres pulgadas, las cuales son las encargadas de dispersar el ácido, bajo el mismo principio de una torre de enfriamiento, su volumen es  $110\text{m}^3$  y tienen una densidad de  $530 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ , con estos datos se calculará su peso, mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow m = \rho * v = 530 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 110 \text{ m}^3 = 58300 \text{ Kg} \cong 58,3 \text{ Ton}$$

### Peso total de la torre

$$P_{TOT} = P_{H_2SO_4} + P_{lad} + P_{Zecor} + P_{ace} + P_{sillas}$$

$$P_{TOT} = 124 \text{ Ton} + 35,3 \text{ Ton} + 6,8 \text{ Ton} + 11,5 \text{ Ton} + 58,3 \text{ Ton}$$

$$\mathbf{P_{TOT} = 235,9 \text{ Ton}}$$

## 4.2 Diagnóstico que sustenta la propuesta.

De acuerdo con cada uno de los diferentes pasos a realizar para el conocimiento del estado actual de la torre de absorción C-03, se plantea un diagnóstico de la condición actual de la torre:

- La planta 218 productora de ácido sulfúrico que labora en el complejo Petroquímico Morón desde hace 21 años, el deterioro de la misma se va presentando con el pasar de los años, es decir, dicha planta posee mucho deterioro de acuerdo a la gran cantidad de tiempo de empleo de la misma. El deterioro de la planta a través del tiempo se ve reflejado en cada uno de sus componentes, esto se observas en la torre de absorción C-03, que actualmente posee gran desgaste a lo largo de su

estructura, la condensación o compuesto de ácido sulfúrico que son emanados por la chimenea se adhieren a las paredes externas de la torre, acelerando los daños a la estructura de la misma, esto motivado a la lluvia externa que disminuye la concentración del ácido, aumentando su agresividad de corrosión.

- En la cúpula superior de la torre C-03, se puede describir un total deterioro de acuerdo con las inspecciones realizadas anteriormente, mostrando altos niveles de riesgos tanto en sus componente estructural, de seguridad, entre otros.
- El material Zecor implementado ha presentado un buen desempeño respecto al ataque químico ubicado en el cuerpo de la torre, sin embargo posee niveles de deterioro en las partes restantes de acero al carbono, los cuales pudieron ser observadas en las inspecciones anteriormente realizadas dando como resultado algunas fugas, en localidades con altas de temperaturas.
- El faldón de la torre C-03 es afectado principalmente por las fugas existentes en el cuerpo, y desde la cúpula superior de la misma, derramando ácido sulfúrico sobre toda la periferia del faldón culminando en los anclajes de la base. Este compuesto químico afecta de gran manera al faldón, que es de acero al carbono, haciéndolo más vulnerable, así como también la lluvia acida. Siendo así que la disminución de espesores, debido al contacto con el ácido sulfúrico u otros agentes como corrosión ambiental, causan daños que pueden conllevar a una falla total del faldón causando un colapso de la torre de absorción C-03.

### 4.2.1 Identificación de Problemas

- El ácido sulfúrico cuando se diluye en agua se convierte en un elemento altamente corrosivo, el cual a bajas concentraciones ataca prácticamente todas las aleaciones metálicas conocidas. Esto es observado por las emisiones de ácido sulfúrico de la chimenea que se adhieren a la pared de la torre y sus fugas generadas, combinadas con agua de la lluvia, causan un daño apreciable a la estructura.
- El cuerpo de la torre en la sección que está formada por acero al carbono, muestra varias fugas que alcanzan una temperatura máxima registrada de 93,4°C, y espesor mínimo de 4,4mm. El deterioro externo de la torre es evidente en todo el cuerpo de la misma, causado principalmente por la lluvia acida y el ambiente marino que en esta zona, es el más alto (salitre) de toda Venezuela.
- El daño interno de la torre es motivado a la degradación de los ladrillos antiácidos, así como a fallas en el recubrimiento de teflón de las paredes.
- El faldón o base de la torre recibe todos los derrames de ácido provenientes de fugas internas y externas, causando disminución de espesores, así como daños en la base de la torre y en el sistema de anclaje de la misma.

## 4.3 Estrategia para generar y seleccionar alternativas de solución

### 4.3.1 Implementación del cambio de material

La torre de absorción C-03 de producción de ácido sulfúrico, es un equipo que está fabricado de diversos tipos de aceros, esto se debe a que por trabajar con ácido sulfúrico, está considerablemente afectado por la corrosión,

aunado a esto el complejo se encuentra ubicado en un ambiente marítimo, debido a esto se busca que los componentes de la torre puedan resistir estos diversos ataques químicos, para esto se utilizan aceros de mayor resistencia a la corrosión.

La selección de materiales de construcción para aplicaciones en una planta de ácido sulfúrico, es un equilibrio entre las características y beneficios de un material, frente a su costo. Durante cierto tiempo, la industria del ácido sulfúrico ha adoptado los materiales estándar de construcción para diferentes aplicaciones. En modo de ejemplo, las torres de absorción y las de secado, se han hecho de ladrillos forrados de acero al carbono. Las ventajas de este diseño incluyen resistencia a la corrosión en un amplio rango de concentraciones de ácido y temperaturas. Las desventajas, sin embargo, incluyen para el mantenimiento dolores de cabeza y altos costos de reparación por los ladrillos. Del mismo modo, la tubería de ácido, distribuidores, y los refrigeradores han tenido la seguridad, mantenimiento, y los consiguientes problemas de fiabilidad desde la elección de material de construcción.

Hace una década la compañía MECS, Inc. presentó el Zecor, como un nuevo material, familia de aleaciones. Esta tecnología de materiales fue diseñada por MECS para mejorar la relación costo-rendimiento, es una propuesta general para las plantas de ácido sulfúrico.

La aleación Zecor ofrece superior resistencia a la corrosión en aplicaciones con gran concentración de ácido sulfúrico, que van desde 93% a 99%, las concentraciones están en una amplia gama de temperaturas. Con un precio competitivo, Zecor ofrece una solución económica total, que va desde el proyecto y costo de instalación, al costo del mantenimiento. La esperanza de vida del Zecor es mayor de veinte años en algunas aplicaciones, las paradas de planta se podrían acortar, si las instalaciones son fabricadas con Zecor. El mantenimiento es mínimo, con menores tasas de corrosión que el

hierro fundido; en los equipos se reduce la formación de sulfato y promueve un área más limpia, más segura y más eficiente para la operación.

#### Ventajas de la aleación Zecor

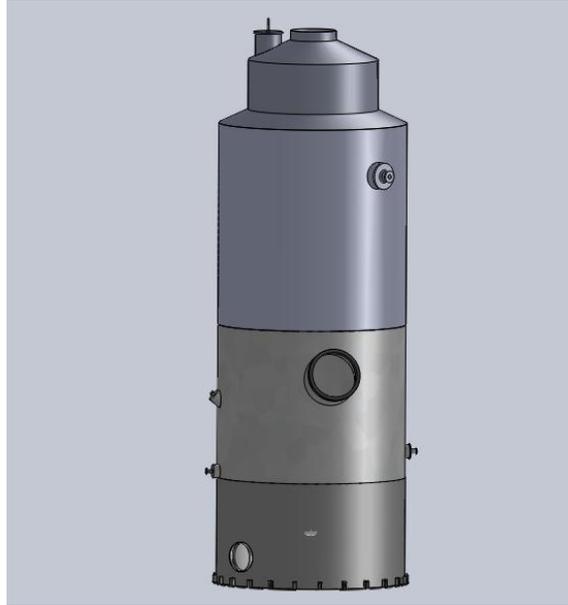
- Menor costo.
- El espesor de la chapa no se limita a unas pocas opciones. Este tipo de aleación está disponible en una variedad de espesores, que permite personalizar los diseños de los equipos para dar cabida a diferentes requisitos de la corrosión.
- La aleación fue probada por procesos de soldadura (GTAW-TIG) de acuerdo con el código ASME.
- La soldabilidad es similar a la del 304/316 acero inoxidable, que permite reparaciones en sitio de una manera más fácil por el personal de mantenimiento de la planta. Inicialmente demostrado en pruebas de laboratorio y ahora en las instalaciones de la planta, esta familia versátil de aleaciones puede resolver muchos de los problemas de materiales en ingeniería.

La torre de absorción C-03, cuenta con tres anillos en su parte superior de Zecor, que fueron instalados en la parada mayor de la planta en el año 2008, estos fueron colocados, para ver el desempeño de dicho material en las instalaciones del Complejo Petroquímico Morón.

#### **4.3.2 Levantamiento 3D del elemento de estudio.**

Se procede a un levantamiento 3D bajo programación CAD, para generar una mejor percepción del elemento de estudio implementar posibles soluciones, estudio de fallas, entre otras. El uso de esta programación se basa en el programa de diseño el cual es gran utilidad para la elaboración de este trabajo de grado. (Ver figuras en los anexos A.13, A.14, A.15 y A.16), a

continuación se presenta una figura correspondiente a la realización de este levantamiento.



**Figura 4.37** Levantamiento 3D, torre de absorción C-03.

### 4.3.3 Generación de las alternativas de solución

En este punto se procede a realizar diferentes soluciones correspondientes al problema planteado, que se basa en evitar que las emisiones de la chimenea que posee dicha torre, y los elementos del medio ambiente, causen el efecto antes mencionado de lluvia ácida. Viéndose afectado mayormente el faldón de la torre C-03.

Se generaron diferentes alternativas de solución respecto al problema que afecta al faldón, las cuales se presentan a continuación:

- Alternativa N°1: El recubrimiento de todo el faldón con acero inoxidable, para así evitar el efecto directo del ácido con el faldón.

- Alternativa N°2: La implementación de un canal recolector con desagüe de material Zecor, colocado en el punto de transición entre la torre propiamente dicha y el faldón de soporte, lo cual permitirá que el canal reciba los derrames de ácido sulfúrico por parte de la chimenea evitando el contacto con el faldón.
- Alternativa N°3: Consiste en la sustitución de todo el faldón de acero al carbono, por un faldón con las mismas dimensiones pero fabricado con un material de acero inoxidable (Zecor).
- Alternativa de N°4: Implementación de un cono invertido de material Zecor, para que los derrames de ácido sean escurridos a través del cono hasta dar con el piso.

Planteadas estas alternativas se procede a realizar una ponderación de criterios para encontrar la alternativa que se adecue mejor a las condiciones dadas por el complejo Petroquímico-Morón.

#### **4.3.3.1 Método de ponderación de criterios para alternativas**

Esta etapa consiste básicamente en realizar la escogencia de la mejor solución, a través de las probables soluciones o alternativas planteadas, para esto se utilizará el método de ponderación de criterios y soluciones. Este método consiste principalmente en tener una visión global de todas las probables soluciones, y observar ventajas y desventajas en cada una de ellas, e incluso realizar modificaciones a lo largo del proceso.

Probables Soluciones:

(PS)<sub>1</sub>: Recubrimiento del faldón de la torre con acero inoxidable.

(PS)<sub>2</sub>: Implementación de una canaleta con desagüe.

(PS)<sub>3</sub>: Sustitución del faldón de acero al carbono por un faldón con material Zecor.

(PS)<sub>4</sub>: Implementación de un cono invertido.

Restricciones (R):

- Restricción 1: Evitar que los derrames de ácido, ataquen el faldón de la torre.
- Restricción 2: No puede incrementarse el peso de la torre en más de una (1) tonelada.
- Restricción 3: las mejoras al proceso no pueden incrementar el diámetro del équido en más de 0,5 m.
- Restricción 4: El monto de la ejecución de la obra no puede ser mayor a 35.000 Bsf.

Criterios (C):

- Criterios 1: Mayor confiabilidad.
- Criterios 2: Simple Fabricación.
- Criterios 3: Menor tiempo de ejecución.
- Criterios 4: Facilidad de desalojo y recolección de ácido.

Aplicación de las restricciones a las posibles soluciones.

Para aplicar las restricciones a las posibles soluciones planteadas se creó una tabla (tabla 4.3) en la cual se colocaron, las restricciones y las posibles soluciones, para ser aplicada cada una de las restricciones a las posibles soluciones, la tabla fue realizada de tal manera que se coloque SI, si dicha solución cumple para una determinada restricción y NO, si no cumple para tal

restricción. De esta manera se logran obtener soluciones que funcionen según las necesidades que sean requeridas.

**Tabla 4.3** Selección de las soluciones evaluándolas con las restricciones

	<b>(PS)<sub>1</sub></b>	<b>(PS)<sub>2</sub></b>	<b>(PS)<sub>3</sub></b>	<b>(PS)<sub>4</sub></b>
<b>Restricción 1</b>	SI	SI	SI	NO
<b>Restricción 2</b>	NO	SI	SI	-
<b>Restricción 3</b>	-	SI	SI	-
<b>Restricción 4</b>	-	SI	NO	-

De acuerdo con el método de ponderación de criterios la alternativa que cumple con todas las restricciones es la posible solución 2.

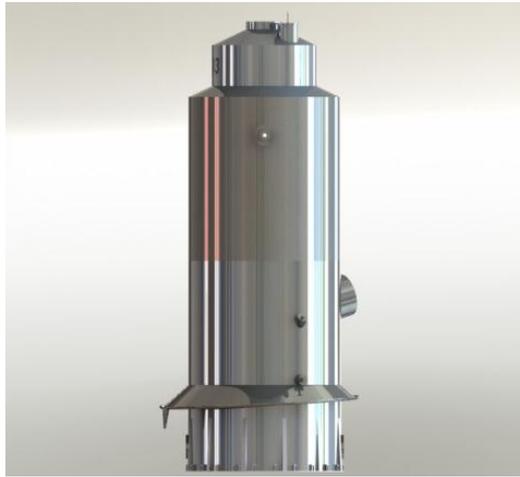
La solución escogida para el problema planteado es la realización de un canal recolector con desagüe, esto evitará que el ácido derramado esté en contacto con el faldón y pueda poner en riesgo la estructura de la torre, así como salpicaduras que puedan poner en riesgo la seguridad de las personas, teniendo esta como solución, se plantearán diversas alternativas de canales, y se evaluarán según los criterios establecidos, con esto se busca realizar una escogencia más asertiva de una solución capaz de solventar el problema planteado.

#### **4.3.4 Generación de las alternativas de solución final**

Basados en el método de ponderación de criterios se concluyó que la mejor alternativa es la N°2 (la canaleta). Ahora se proceden a plantear

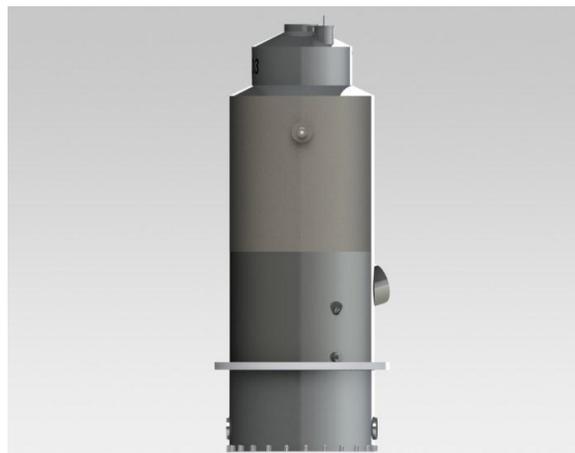
alternativas de solución para así obtener la más adecuada. Estas son las siguientes:

- Alternativa de solución N°1: implementación de un cono con inclinación y desagüe para asegurar el escurrimiento correcto del ácido. Más vistas ver anexos figura A.21 y A.22.



**Figura 4.38** Alternativa de solución N°1.

- Alternativa de Solución N°2: implementación de un canal con ángulo de 90° para la recopilación de los derrames de ácido, estas son las más vistas en sistemas de desagüe, para que los derrames de ácido sean escurridos a través del cono hasta dar con el piso. Ver anexos en las figura A.19 y A.20.



**Figura 4.39** Alternativa de solución N°2.

- Alternativa de Solución N°3: implementación de un canal tipo cono de material Zecor con desagüe, para recopilar el ácido tipo embudo (ver anexos figura A.17 y A.18).



**Figura 4.40** Alternativa de solución N°3.

Como se conoce que el problema es solventado con la alternativa de solución se procede a generar una sugerencia añadida o anexa a la solución final.

#### **4.3.4.1 Método de ponderación de criterios para alternativas de solución finales**

Basados en el método de ponderación de criterios se concluyó que la mejor alternativa es la N°2 (la canaleta). Ahora se proceden a plantear alternativas de solución para así obtener la más adecuada. Estas son las siguientes:

Probables Soluciones:

(PS)<sub>1</sub>: Canal Inclineda

(PS)<sub>2</sub>: Canal con ángulo de 90°

(PS)<sub>3</sub>: Canal en V

**Tabla 4.4** Selección de las soluciones evaluándolas con las restricciones

	(PS) <sub>1</sub>	(PS) <sub>2</sub>	(PS) <sub>3</sub>
<b>Restricción 1</b>	SI	SI	SI
<b>Restricción 2</b>	SI	SI	SI
<b>Restricción 3</b>	SI	SI	SI
<b>Restricción 4</b>	SI	SI	SI

De acuerdo con el método de ponderación de criterios la, las soluciones que cumple con todas las restricciones son las posibles soluciones 1, 2, 3.

Estas posibles soluciones, se convierten en Soluciones

PS<sub>1</sub> se convierte en la solución S<sub>1</sub>.

PS<sub>2</sub> se convierte en la solución S<sub>2</sub>.

PS<sub>3</sub> se convierte en la solución S<sub>3</sub>.

**Tabla 4.5** Ponderación de Criterios.

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	No. de veces	PC <sub>x</sub>
C <sub>1</sub>					3	4
C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>				2	3
C <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>			1	2
C <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>		0	1
Orden de importancia	1ero	2do	3ero	4to		

**Ponderación de soluciones a cada criterio.**

- Confiabilidad.

**Tabla 4.6** Criterio 1

C1	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	No. de veces	P <sub>x1=N</sub>
S <sub>1</sub>				0	1
S <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>			2	3
S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>		1	2
Orden de aceptación	3ero	1ero	2do		

- Simple Fabricación.

**Tabla 4.7** Criterio 2

C1	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	No. de veces	P <sub>x2=N</sub>
S <sub>1</sub>				0	1
S <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>			1	2
S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>		2	3
Orden de aceptación	3ero	2do	1ero		

- Tiempo de Ejecución.

**Tabla 4.8** Criterio 3

C1	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	No. de veces	P <sub>x3=N</sub>
S <sub>1</sub>				0	1
S <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>			1	2
S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>		2	3
Orden de aceptación	3ero	1ero	2do		

- Facilidad de desalojo y recolección de acido

**Tabla 4.9** Criterio 4

C1	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	No. de veces	P <sub>x4=N</sub>
S <sub>1</sub>				2	3
S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>			0	1
S <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>3</sub>		1	2
Orden de aceptación	1ero	3ero	2do		

Para la solución 1

(PC)1.P11+(PC)2.P12+(PC)3.P13+(PC)4.P14+(PC)5.P15

$$(4)(1) + (3)(1) + (2)(1) + (1)(3) = \mathbf{12}$$

Para la solución 2

(PC)1.P21+(PC)2.P22+(PC)3.P23+(PC)4.P24+(PC)5.P25

$$(4)(3) + (3)(2) + (2)(2) + (1)(1) = \mathbf{23}$$

Para la solución 3

(PC)1.P31+(PC)2.P32+(PC)3.P33+(PC)4.P34+(PC)5.P35

$$(4)(2) + (3)(3) + (2)(3) + (1)(2) = \mathbf{25}$$

Por lo tanto luego del estudio realizado a través del método de ponderación de criterios y soluciones, se llega a la conclusión de que la solución más apropiada de acuerdo a los criterios, restricciones y relaciones anteriormente descritas es la solución número tres (3), ya que obtuvo la mayor ponderación final.

#### 4.4 Mejor Solución

Tomando en cuenta todo el estudio realizado de acuerdo con las inspecciones, entrevistas, cálculos, diseño y métodos. Se expone la mejor solución.

Conociendo la condición actual, que son cada uno de los problemas encontrados en la torre de absorción C-03, se define una solución general, para solventar dichos problemas.

Se plantea implementar un canal recolector de forma cónica, entre el punto de unión de la torre y el faldón de soporte.

También se pudo apreciar el gran deterioro existente en el faldón, por esto se plantea una alternativa basada en aplicar refuerzos en toda periferia del mismo. Dando así un soporte, brindando mayor seguridad con respecto al deterioro del material, que es causado por la corrosión en ambientes marítimos, esto permitirá generar una proyección de vida útil más larga. (Ver figura 4.41)



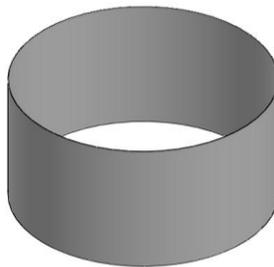
**Figura 4.41** Refuerzos sugeridos al faldón.

*Análisis estático y de espesores usando programación de diseño asistido.*

### Análisis estático

En el presente punto se evaluará el faldón de la torre de absorción, con un estudio estático con elementos finitos, de la condición actual del faldón de soporte, y un análisis del mismo con un refuerzo en su base que logren garantizar una mayor confiabilidad estructural. Las dimensiones usadas son referidas en el plano del apéndice C.

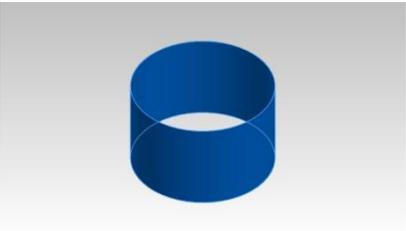
A continuación se presenta el desarrollo de dicho análisis. En la figura 4.42 y la tabla 4.10, se muestran las propiedades del elemento a estudiar.



**Figura 4.42** Faldón.

Masa:1731.3 lb  
 Volumen:46982.4 in<sup>3</sup>  
 Densidad:0.0368498 lb/in<sup>3</sup>  
 Peso:1730.12 lb

**Tabla 4.10** Propiedades del Material.

Referencia de modelo	Propiedades
	<p><b>Nombre:</b> A285 Grado C  <b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico elástico lineal  <b>Criterio de error predeterminado:</b> Tensión máxima de von Mises  <b>Límite elástico:</b> 2.05e+008N/m<sup>2</sup>  <b>Límite de tracción:</b> 5.15e+008N/m<sup>2</sup>  <b>Módulo elástico:</b> 2e+009 N/m<sup>2</sup>  <b>Densidad:</b> 1020 kg/m<sup>3</sup>  <b>Módulo cortante:</b> 3.189e+008 N/m<sup>2</sup></p>

**Cargas y Sujeciones**

Para garantizar mejoras en la implementación de refuerzos se realiza un estudio del faldón sin refuerzos y con refuerzos, para así demostrar la efectividad de dicha implementación. En las siguientes tablas (tabla 4.11, 4.12, 4.13, 4.14), se muestra las restricciones del faldón así como la sujeción al suelo (geometría fija), sus reacciones y la carga aplicada (fuerza normal) sobre el faldón. La fuerza normal viene dada a partir del peso total de la torre calculado anteriormente.

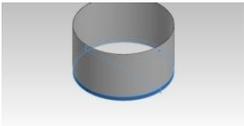
**Tabla 4.11** Sujeciones Faldón sin Refuerzos.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción		Detalles de sujeción	
<b>Fijo-1</b>			<b>Entidades:</b> 1 cara(s) <b>Tipo:</b> Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
<b>Componentes</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultante</b>
<b>Fuerza de reacción(N)</b>	-6.5918	2.27041e+006	-3.41455	2.27041e+06

**Tabla 4.12** Carga Faldón sin Refuerzos.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga		
<b>Fuerza-1</b>		<b>Entidades:</b> 1 cara(s) <b>Tipo:</b> Aplicar fuerza normal <b>Valor:</b> 2,31418e+006N		

**Tabla 4.13** Sujeciones Faldón con Refuerzos.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción		Detalles de sujeción	
<b>Fijo-1</b>			<b>Entidades:</b> 2 cara(s) : <b>Tipo:</b> Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
<b>Componentes</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultante</b>
<b>Fuerza de reacción(N)</b>	30,5455	2,28148e+006	59,8099	2,28148e+006

**Tabla 4.14** Carga Faldón con Refuerzos

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
<b>Fuerza-1</b>		<b>Entidades:</b> 1 cara(s) <b>Tipo:</b> Aplicar fuerza normal <b>Valor:</b> 2.31418e+006N

El mallado realizado es de vital importancia debido a que mientras más particiones (elementos) se realicen se asegura mayor precisión en los resultados obtenidos. Las características del mallado se aprecian en las tablas 4.15, 4.16, 4.17 y la figura 4.43.

**Tabla 4.15** Información de Malla.

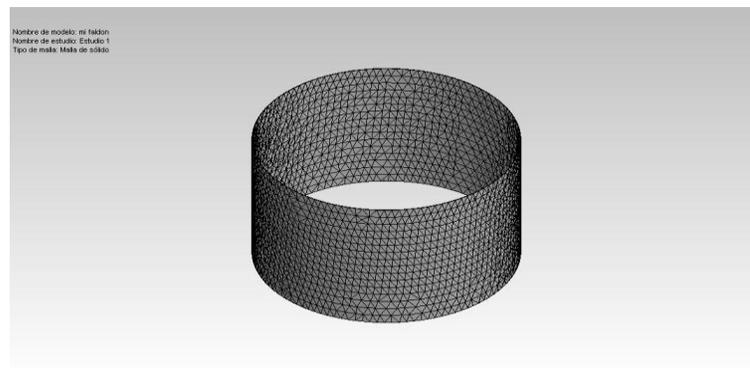
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	218,102 mm
Tamaño mínimo del elemento	218,102 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

**Tabla 4.16** Información de Malla – Detalles, Faldón sin Refuerzo.

Número total de nodos	20313
Número total de elementos	9907
Cociente máximo de aspecto	51,543
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	0
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	92,2
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04

**Tabla 4.17** Información de Malla – Detalles, Faldón con Refuerzo.

Número total de nodos	20889
Número total de elementos	10125
Cociente máximo de aspecto	30,232
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	0
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	88,6
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:05



**Figura 4.43** Mallado faldón.

Se puede observar que las fuerzas de reacción son iguales a las calculadas anteriormente esto se debe a que el cálculo realizado no depende del mallado mostrado o el número de particiones empleada. Ver tabla 4.18 y 4.19.

**Tabla 4.18** Fuerzas de reacción, faldón sin refuerzo.

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
<b>Todo el modelo</b>	N	-6.5918	2.270e+006	-3.41455	2.2704e+006

**Tabla 4.19** Fuerzas de reacción, faldón con refuerzo.

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
<b>Todo el modelo</b>	N	30.5455	2.2814e+006	59.8099	2.2814e+006

Los diferentes esfuerzos ocasionados debido a la carga aplicada, son estudiados para cada uno de los sistemas coordenados, arrojando datos de máxima y mínima tensión y el nodo en el cual se ubica. Estas tensiones tanto en X, Y y Z se muestran a continuación. (Ver figuras 4.44 a la 4.49)

### Tensiones Sin Refuerzo

Tensión normal de X

Mín:  $-1,03216 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>

Nodo: 3629

Máx:  $2,99025 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>

Nodo: 8111

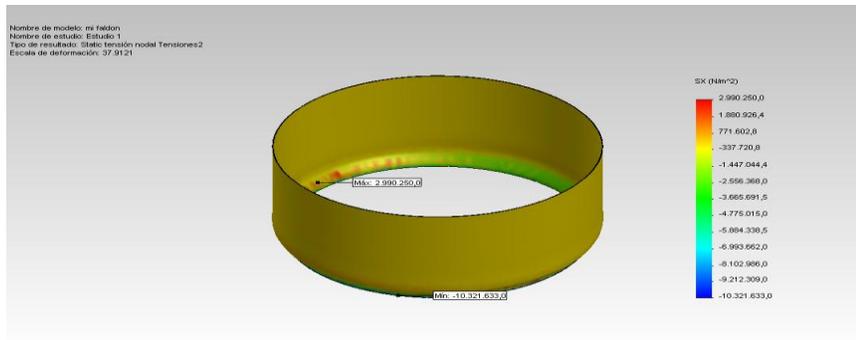


Figura 4.44 Tensión normal de X sin refuerzos.

### Tensiones con Refuerzo

Tensión normal de X

Mín: 130,301 N/m<sup>2</sup>

Nodo: 300

Máx:  $1,04604 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>

Nodo: 12631

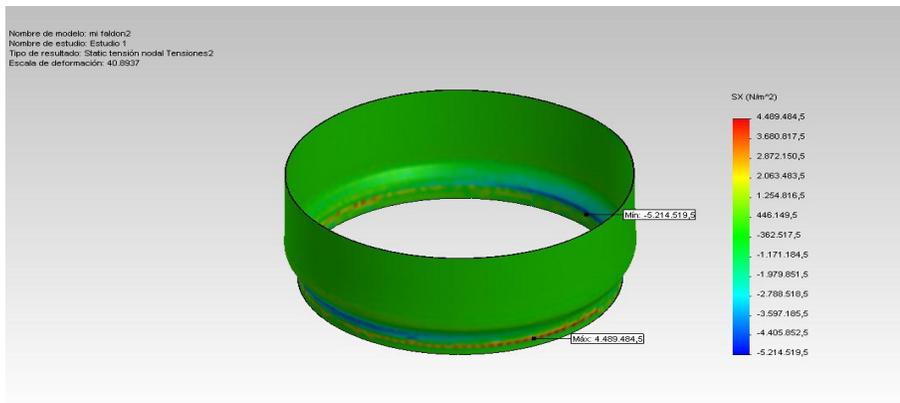


Figura 4.45 Tensión normal de X con refuerzos.

### Tensiones Sin Refuerzo

Tensión normal de Y  
 Mín.  $-1,5728e+007$  N/m<sup>2</sup>  
 Nodo: 3629  
 Máx.  $-5,02712e+006$  N/m<sup>2</sup>  
 Nodo: 3808

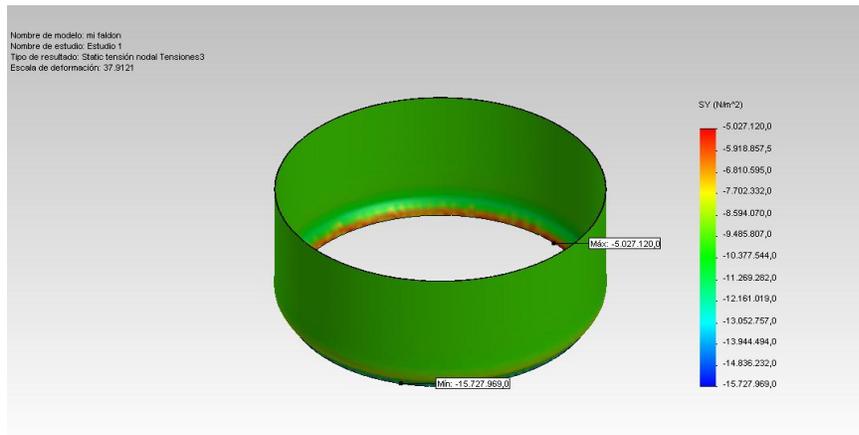


Figura 4.46 Tensión normal de Y sin refuerzos.

### Tensiones con Refuerzo

Tensión normal de Y  
 Mín.  $-1,17366e+007$  N/m<sup>2</sup>  
 Nodo: 7793  
 Máx.  $3,24442e+006$  N/m<sup>2</sup>  
 Nodo: 9018

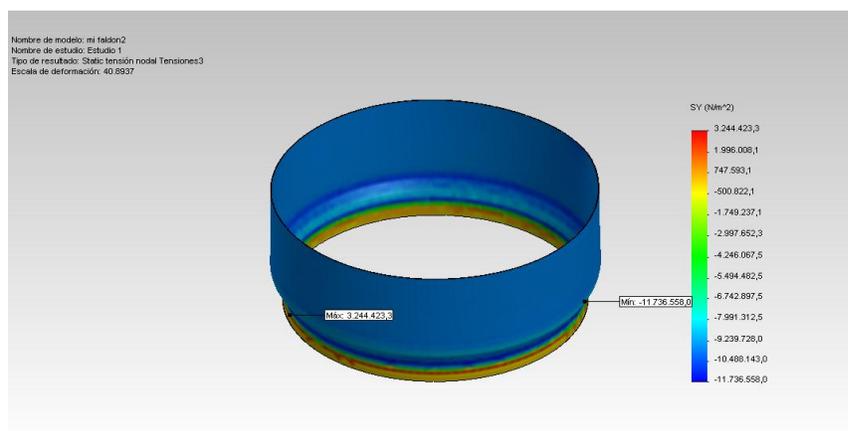


Figura 4.47 Tensión normal de Y con refuerzos.

### Tensiones Sin Refuerzo

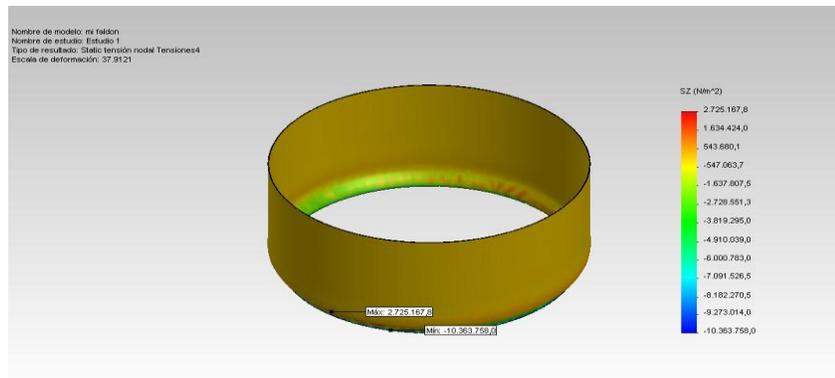
Tensión normal de Z

Mín.  $-1,03638e+007$  N/m<sup>2</sup>

Nodo: 3629

Máx.  $2,72517e+006$  N/m<sup>2</sup>

Nodo: 8934



**Figura 4.48** Tensión normal de Z sin refuerzos.

### Tensiones con Refuerzo

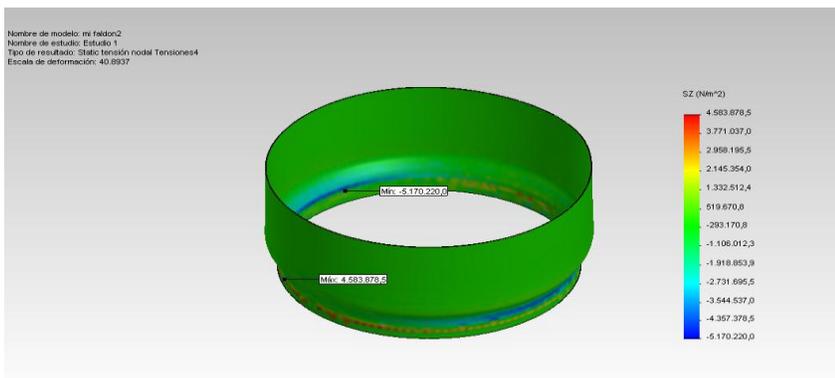
Tensión normal de Z

Mín.  $-1,03638e+007$  N/m<sup>2</sup>

Nodo: 3629

Máx.  $2,72517e+006$  N/m<sup>2</sup>

Nodo: 8934



**Figura 4.49** Tensión normal de Z con refuerzos.

Una vez obtenidas las tensiones para X, Y y Z. Se genera el cálculo de la tensión de Von Mises que es la resultante de todas las tensiones aplicadas al

elemento. Estos resultados se observan a continuación. (Ver Figuras 4.50 y figura 4.51)

**Tensiones Sin Refuerzo**

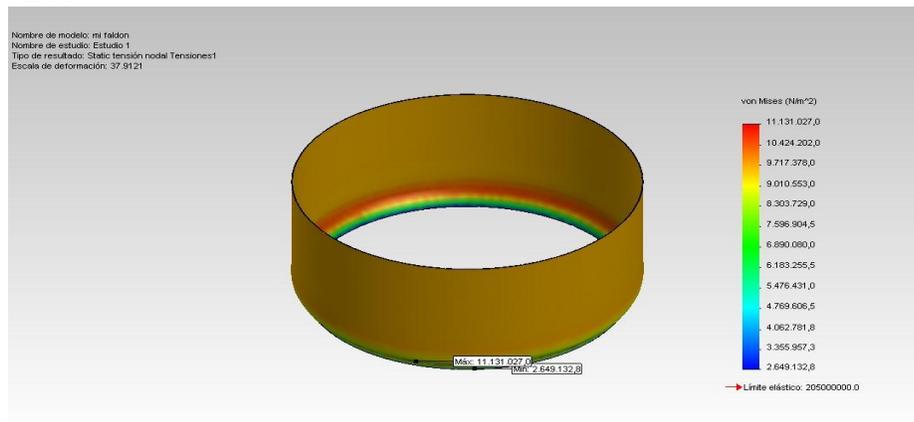
Tipo: Tensión de Von Mises

Mín. 2,64913e+006 N/m<sup>2</sup>

Nodo: 414

Máx. 1,1131e+007 N/m<sup>2</sup>

Nodo: 1244



**Figura 4.50** Tensión de Von Mises sin refuerzos.

**Tensiones con Refuerzo**

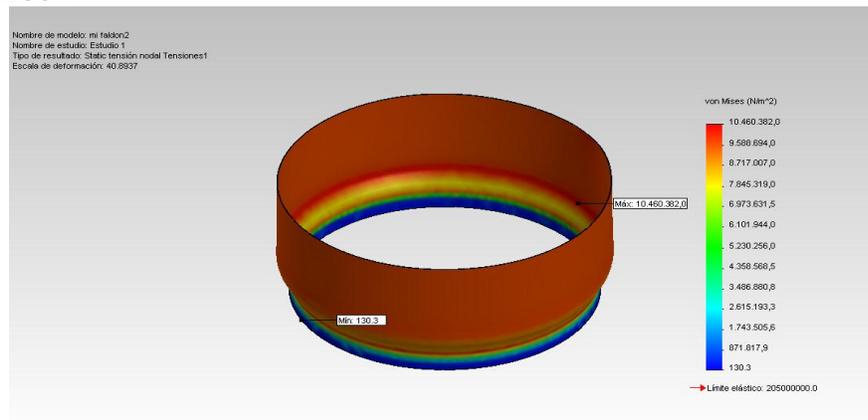
Tipo: Tensión de von Mises

Mín. 130,301 N/m<sup>2</sup>

Nodo: 300

Máx. 1,04604e+007 N/m<sup>2</sup>

Nodo: 12631



**Figura 4.51** Tensión de Von Mises con refuerzos.

Ahora se muestran los datos obtenidos respecto al desplazamiento en X, en Y y en Z. Observándose también los valores máximos y mínimos y su respectivo nodo. (Ver figuras 4.52 a la 4.57)

### Desplazamientos Sin Refuerzo

Desplazamiento de X

Mín. -5.77905 mm

Nodo: 7913

Máx. 5.80002 mm

Nodo: 1235

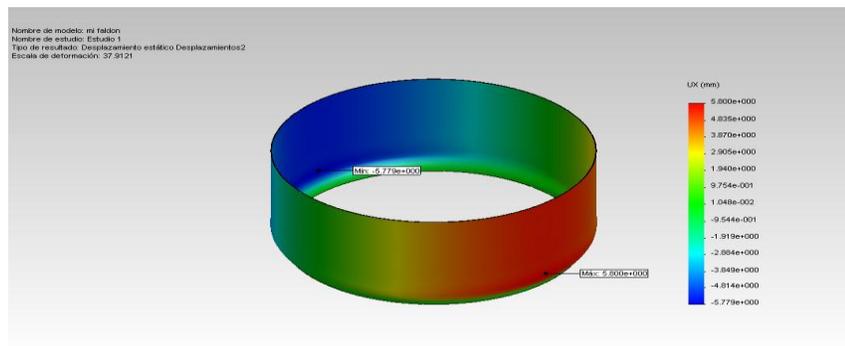


Figura 4.52 Desplazamiento de X sin refuerzos.

### Desplazamientos con Refuerzo

Desplazamiento de X

Mín. -5,76973 mm

Nodo: 6652

Máx. 5,93407 mm

Nodo: 6717

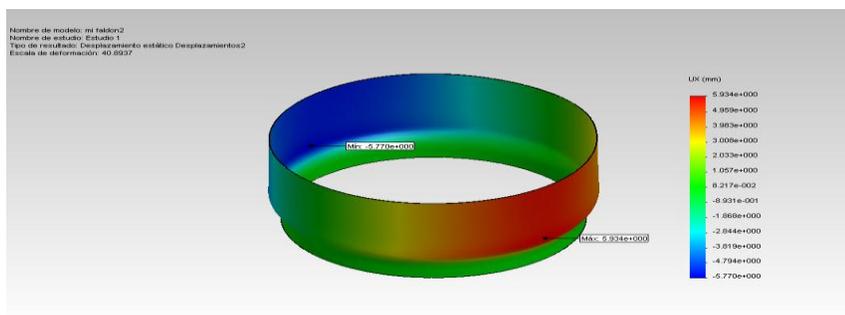


Figura 4.53 Desplazamiento de X con refuerzos.

### Desplazamientos Sin Refuerzo

Desplazamiento de Y

Mín.-15,3434 mm

Nodo: 3576

Máx.0 mm

Nodo: 113

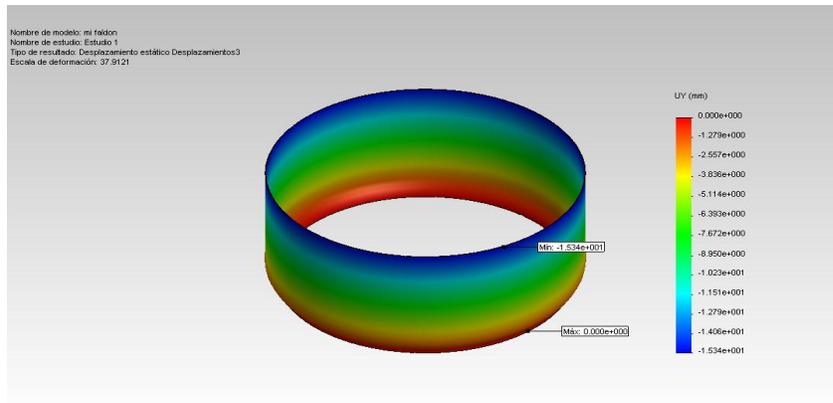


Figura 4.54 Desplazamiento de Y sin refuerzos.

### Desplazamientos con Refuerzo

Desplazamiento de Y

Mín. -14,2247 mm

Nodo: 326

Máx. 0,0153075 mm

Nodo: 2981

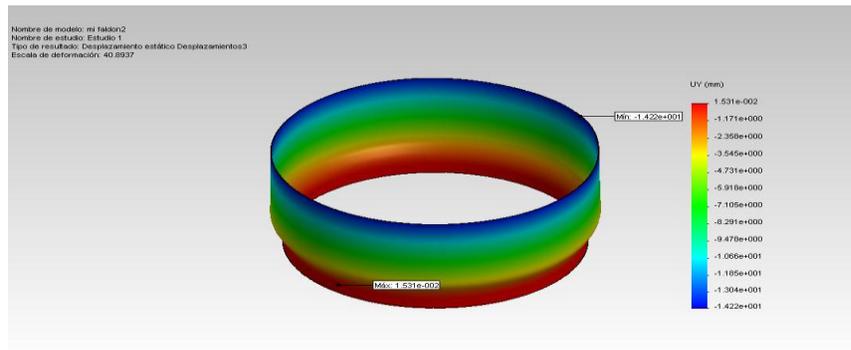


Figura 4.55 Desplazamiento de Y con refuerzos.

## Desplazamientos Sin Refuerzo

Desplazamiento de Z

Mín. 5,74204 mm

Nodo: 5791

Máx. 5,75177 mm

Nodo: 8041

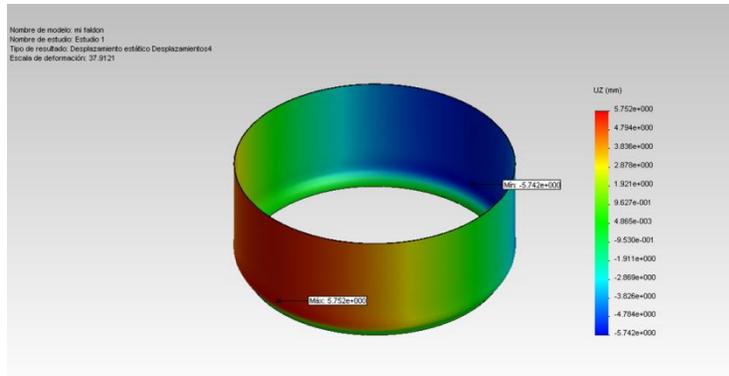


Figura 4.56 Desplazamiento de Z sin refuerzos.

## Desplazamientos con Refuerzo

Desplazamiento de Z

Mín. 6,17951 mm

Nodo: 6022

Máx. 5,90035 mm

Nodo: 8125

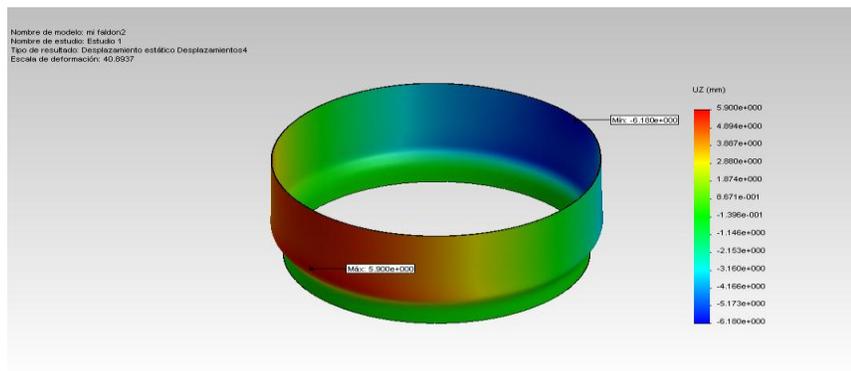


Figura 4.57 Desplazamiento de Z con refuerzos.

A continuación se muestran los desplazamientos resultantes con refuerzos y sin refuerzos. (Ver figura 4.58 y figura 4.59)

**Desplazamientos Sin Refuerzo**

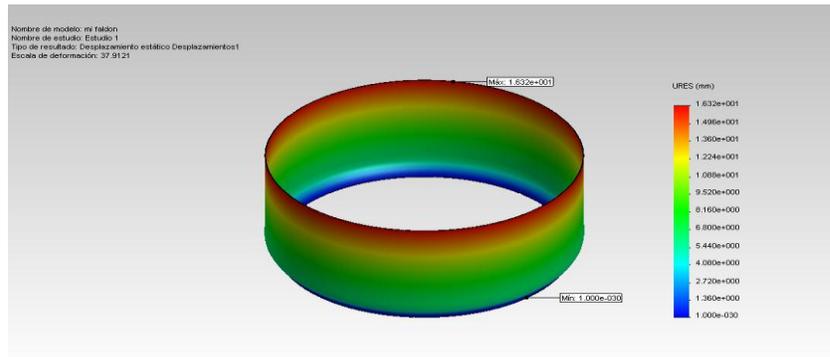
Desplazamiento resultante

Mín 0 mm

Nodo: 113

Máx.16,3207 mm

Nodo: 54



**Figura 4.58** Desplazamiento resultante sin refuerzos.

**Desplazamientos con Refuerzo**

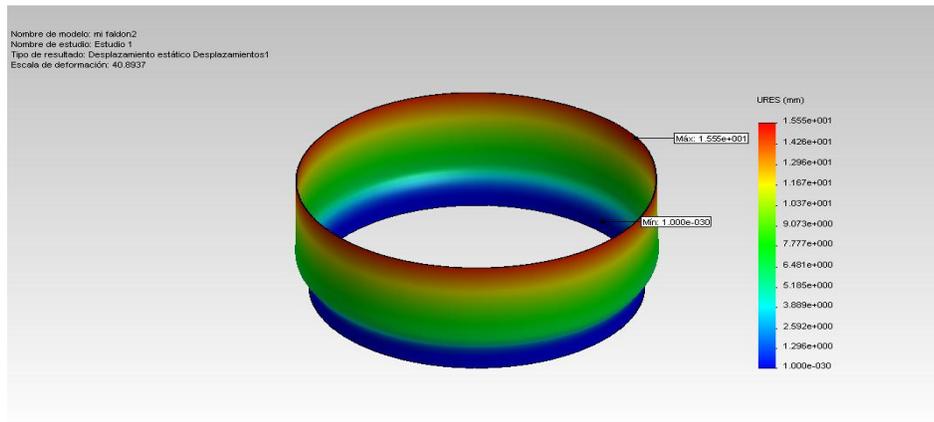
Desplazamiento resultante

Mín.0 mm

Nodo: 113

Máx.15,554 mm

Nodo: 326



**Figura 4.59** Desplazamiento resultante con refuerzos.

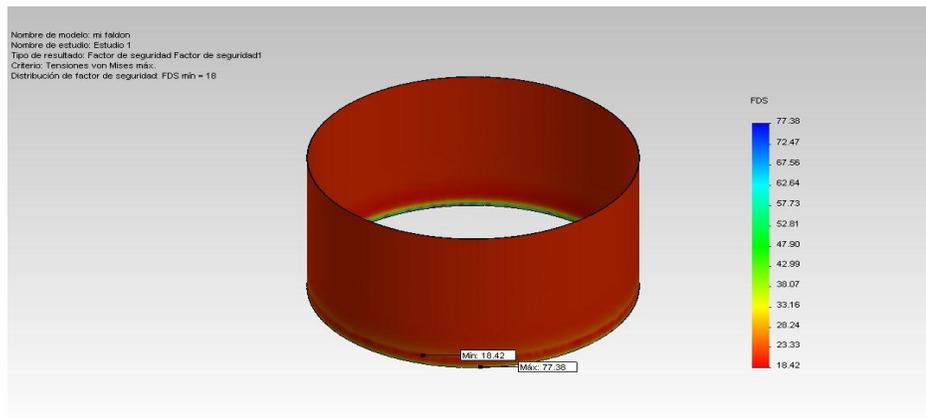
A continuación se muestran los factores de seguridad resultantes con refuerzos y sin refuerzos. (Ver figura 4.60 y figura 4.61)

### Factor de seguridad Sin Refuerzo

Tensión de von Mises máx. 77,3838

Mín. 18,417

Nodo: 1244



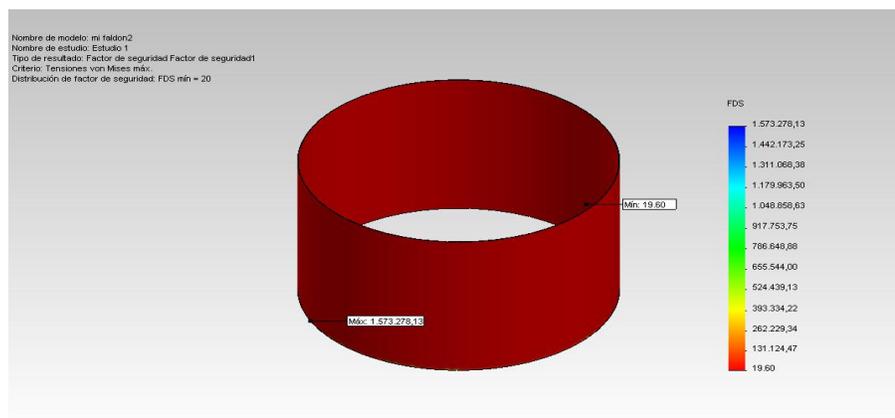
**Figura 4.60** Factor de seguridad sin refuerzos.

### Factor de seguridad con Refuerzo

Tensión de von Mises máx. 1,57328e+006

Mín. 19,5978.

Nodo: 414.



**Figura 4.61** Factor de seguridad con refuerzos.

En el análisis realizado se observa que la implementación de los refuerzos beneficia de gran manera al elemento de estudio.

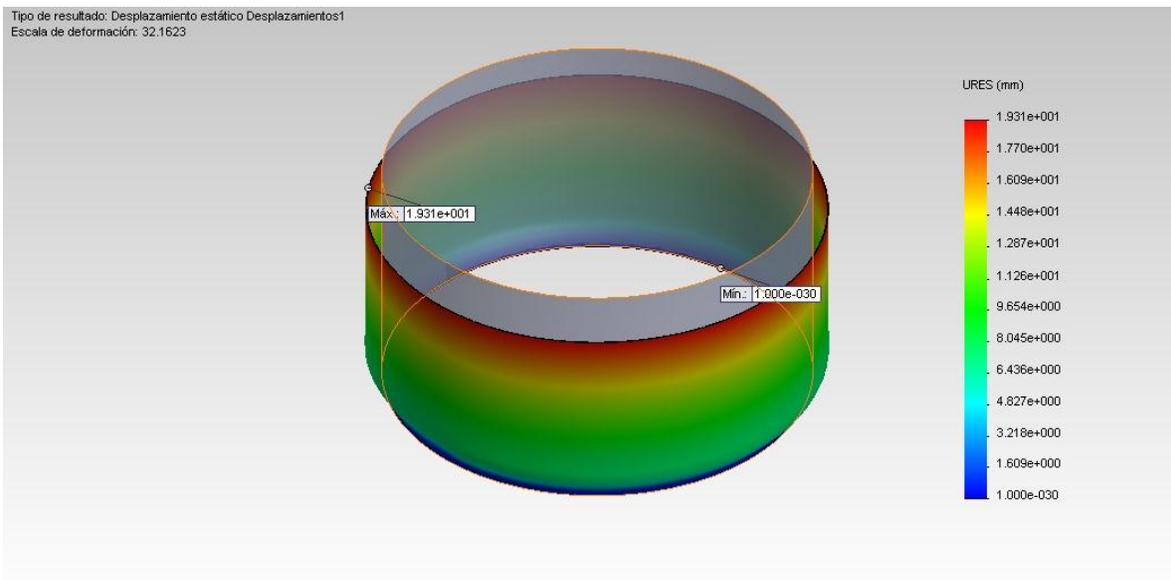
En cuanto a la tensión de Von Mises que viene a ser la resultante, se observa que la máxima y mínima del faldón con refuerzos es de menor valor en comparación a el faldón con refuerzos, arrojando como dato inminente que con refuerzos el elemento es sometido a menor tensión.

Para el caso del desplazamiento se observa que el resultante con refuerzos también posee un menor valor en comparación al faldón sin refuerzo en relación a su desplazamiento resultante.

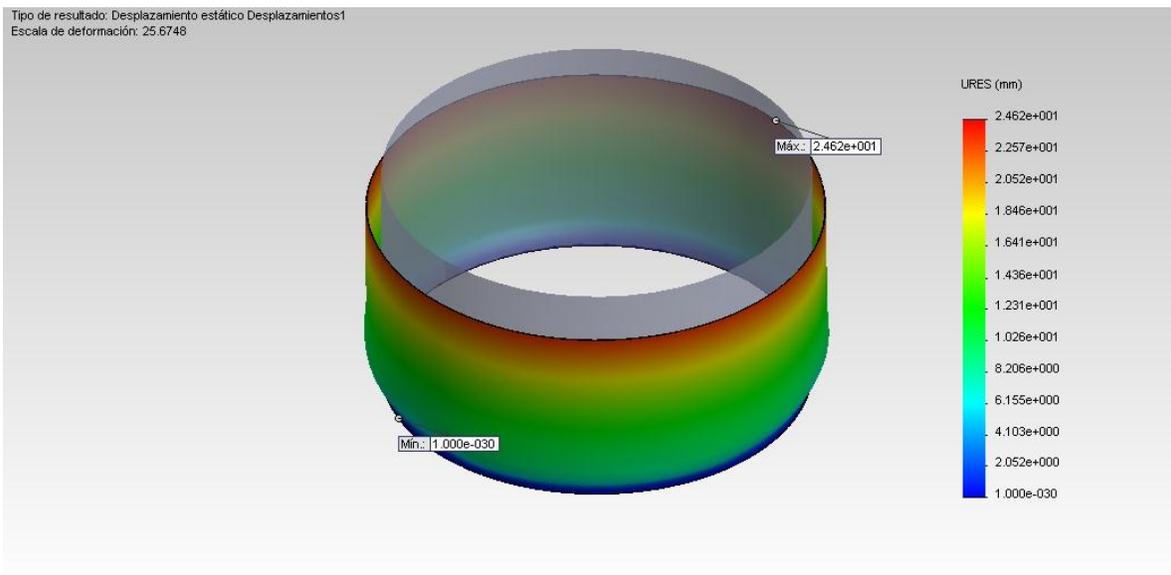
En el factor de seguridad se observa que para los dos casos el valor es mayor que uno mostrando un confiabilidad aun así el faldón con refuerzos muestra mejores valores.

### **Análisis de espesores**

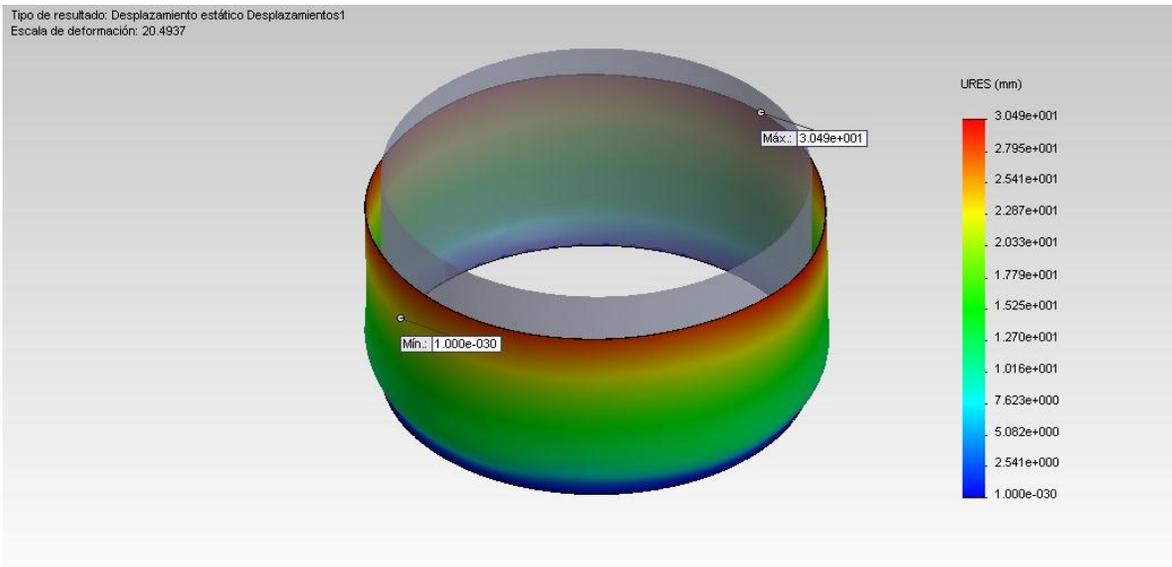
Se conoce que el contacto con el ácido sulfúrico va debilitando las capas de acero reduciendo el espesor. Por tanto se plantea la continuidad de esta problemática mostrando así el resultado si la disminución de espesores siguiese presente, para este estudio bajo programación CAD se realizó la variación de espesores en orden descendente con valores como 11mm, 9mm, 7mm y 5mm. Y así observar los desplazamientos del faldón. (Ver figuras 4.62 a la 4.66)



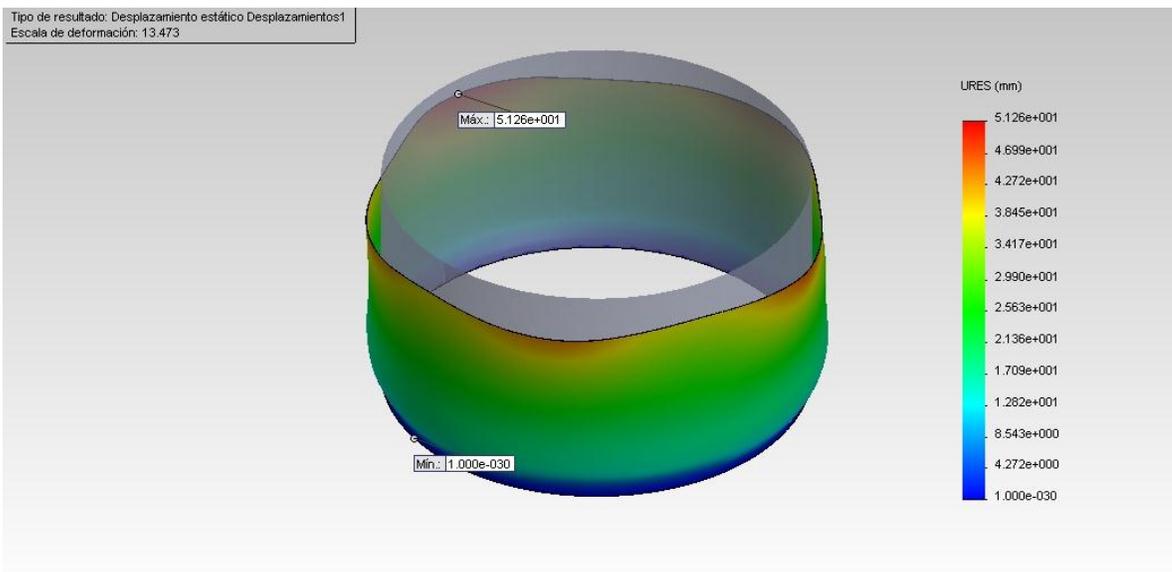
**Figura 4.62** Faldón sin refuerzo, espesor 11 mm.



**Figura 4.63** Faldón sin refuerzo, espesor 9 mm.



**Figura 4.64** Faldón sin refuerzo, espesor 7 mm



**Figura 4.65** Faldón sin refuerzo, espesor 5 mm.

En los resultados obtenidos se observan los niveles de desplazamientos que van aumentando de acuerdo a la disminución de espesor. Siendo 5mm el espesor más crítico donde es visible una deformación total del elemento de estudio. Esto arroja la importancia de evitar el contacto del ácido sulfúrico con el faldón.

#### **4.4.1 Formulación de la propuesta de solución.**

Basados en las diferentes consideraciones desarrolladas en la presente investigación, se identifican dos áreas dentro de la misma como son: El Recipiente Contenedor y el Soporte de este (Faldón).

En función de estas consideraciones se procede al planteamiento de una propuesta de solución que pueda garantizar la condición operativa y segura en la instalación.

Como en la propuesta se distinguen dos áreas; con respecto al Recipiente contenedor se ensayaron varios materiales porque la alternativa más fuerte fue la de sustituir el material y después de las pruebas se seleccionó el acero inoxidable Zecor con lo cual según la información del proveedor garantiza 20 años de operación con ácido sulfúrico.

En relación al Faldón, la idea principal fue impedir que el ácido sulfúrico proveniente del Sistema llegase hasta el faldón de soporte.

De todas las alternativas generadas y utilizando la herramientas del Método de Ponderación de Criterios (Vílchez, 2008), se seleccionó la alternativa de un Canal Recolector en la periferia del Recipiente Contenedor en su parte baja, cuya función será la de coleccionar la condensación de los vapores de ácido y las eventuales fugas que se pudieran originar en la operación y se desvía hacia un recipiente contenedor para su disposición final.

En la presente investigación se consideró la proposición presentada por la empresa que el diseño de la propuesta fuera de la forma más sencilla, de fácil implementación y construcción, sin comprometer la seguridad de la planta.

En el futuro mediato (08/2011) se tiene previsto un cambio de la superficie del fondo de contenedor que contiene el volumen de ácido de la torre, además se esto involucra el cambio de la forma del fondo de “toriesférica” a cónica. También se espera aprovechar este diseño para extender el cono de remplazo, con respecto a su altura y pueda funcionar como canal recolector.

También en consideración diversos aspectos Geométricos Dimensionales para esta propuesta, como por Ej. No puede incrementarse el diámetro del equipo en más de 500 mm, por estar este equipo dentro de las instalaciones del sistema completo y existen restricciones en cuanto a la estructura que recubre la periferia del mismo.

El material a utilizar para la fabricación del canal recolector será el mismo del Recipiente Contenedor (Aleación Zecor), la cual posee propiedades adecuadas para trabajar en entornos con una fuerte corrosión. Conociendo que dicha propuesta no posee inclinación hacia la tubería de desagüe es probable que existan depósitos de ácido en alguna ubicación a lo largo del canal, lo cual no represente un riesgo debido al material empleado que resiste a cabalidad el ataque corrosivo.

El aspecto económico en la implementación de este de dicha propuesta, no representa gastos tan significativos, ya que se aprovechara el material del cambio del cabezal de la torre, debido a que no es necesario gran cantidad de material. Ver anexo A.29.

Como se conoce que en la próxima parada mayor no se estipuló el cambio del faldón, para el sustento del mismo como alternativa sugerida se propone reforzar el faldón debido al desgaste evidenciado en el mismo, esto permitirá redistribuir uniformemente la carga aplicada debido al peso de la torre. Con esto se lograra garantizar que dicha estructura no tendrá ningún riesgo de colapso o debilitación en un área específica.

El material para la realización de estos soportes será acero al carbono, de preferencia A-285 grado C, que actualmente posee el faldón, no es necesario

material inoxidable debido a que los derrames de ácido se solventaran con la alternativa de la canal ubicada en la parte superior del faldón.

La implementación de estas soluciones se busca garantizar que la planta 218 ácido sulfúrico, pueda operar de manera segura hasta el 2014 o por un periodo mayor de tiempo, hasta el cual se tenga previsto la puesta en marcha de la nueva planta.

# CAPÍTULO 5

## *Conclusiones y Recomendaciones*

---

---

### **5.1 CONCLUSIONES**

A continuación se presentan las conclusiones originadas del presente trabajo de investigación como resultado de cada fase del proceso metodológico seguido.

Mediante la investigación inicial, se determinó un funcionamiento inadecuado, de la torre de absorción C-03, presentando un grado de deterioro acelerado de su estructura y todos sus sistemas. Esto se logró evidenciar a través de los análisis de ensayos no destructivos.

En función del análisis de la situación actual se generaron las alternativas de solución, las cuales se enmarcaron en las limitaciones que presentó la empresa, debido a la importancia de este equipo en el proceso de producción de ácido sulfúrico.

Según la metodología de la ponderación de criterios, utilizada para la selección de la alternativa más viable, se establecieron las siguientes soluciones : El refuerzo del faldón, Canal de desagüe y sustitución del material por la aleación Zecor en la parte superior.

La evaluación de las diferentes alternativas de solución para asegurar el funcionamiento normal de la torre de absorción C-03, permitió establecer la sustitución del material del cuerpo de la torre acero A-283 por la aleación Zecor con lo cual se garantiza un funcionamiento normal del equipo de 20 años, asumiendo la misma condición para el canal recolector perimetral.

Debido al estado de deterioro de la estructura de soporte (faldón) se requirió reforzar esta, para restituir la condición estructural de la misma.

Todas las propuestas generadas en la presente investigación fueron aceptadas por la empresa y se están desarrollando.

Las mejoras o soluciones realizadas van a garantizar una confiabilidad estructural de la planta por un periodo de tiempo mayor o igual al año 2014.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Como trabajos futuros, se sugiere que se realicen periódicamente diversos tipos de inspecciones, que puedan aportar información específica referente al estado del equipo, con esto se busca hacer un monitoreo para así conocer la condición operativa del mismo. Se sugiere realizar inspecciones visuales más frecuentes en las estructuras y áreas comunes a la torre, realizar ensayos no destructivos, como medición de espesores y termografía cada trimestre del año, para conocer fallas o debilitación del material, debido a que el compuesto que maneja dicha planta acelera los procesos de deterioro.

La pronta implementación de la solución planteada, con un riguroso seguimiento constructivo, para que su aplicación sea modelo para próximas plantas de este tipo en el país.

Establecer un seguimiento en el tiempo a las modificaciones realizadas al equipo, con respecto a cambio de material y soluciones planteadas, para detectar alguna desviación o la posibilidad de una mejora continua.

Verificar en el manual de procesos de la planta, el procedimiento teórico para establecer una relación entre este y las actividades realizadas diariamente, para prevenir un desgaste en función de una mala operación.

# *ANEXOS*

---



**Anexo 1.** Cámara termográfica..



**Anexo 2.** Cámara termográfica y componentes.



**Anexo 3.** Instrumento para medición de espesores.



**Anexo 4.** Punta del instrumento para medición de espesores.



**Anexo 5.** Imagen torre absorción C-03 inspección visual antes de medición de espesores, ubicadas en el lado nor-oeste de la carcaza de la torre.



**Anexo 6.** Imagen torre absorción C-03 inspección visual antes de la medición de espesores, fuga por la soldadura de unión de la manga ubicada en el lado sur-este de la carcaza de la torre.



Anexo 7. Limpiador removedor.



Anexo 8. Penetrante.



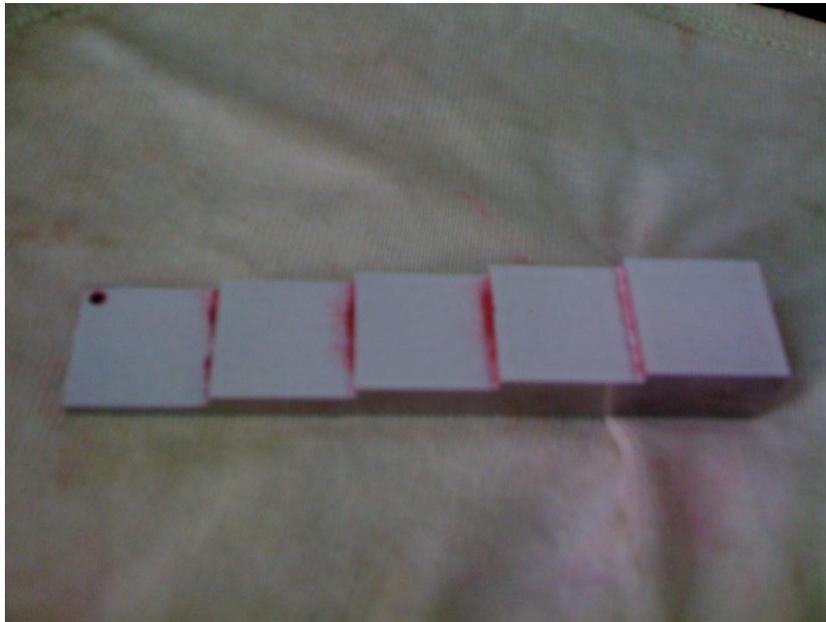
**Anexo 9.** Revelador.



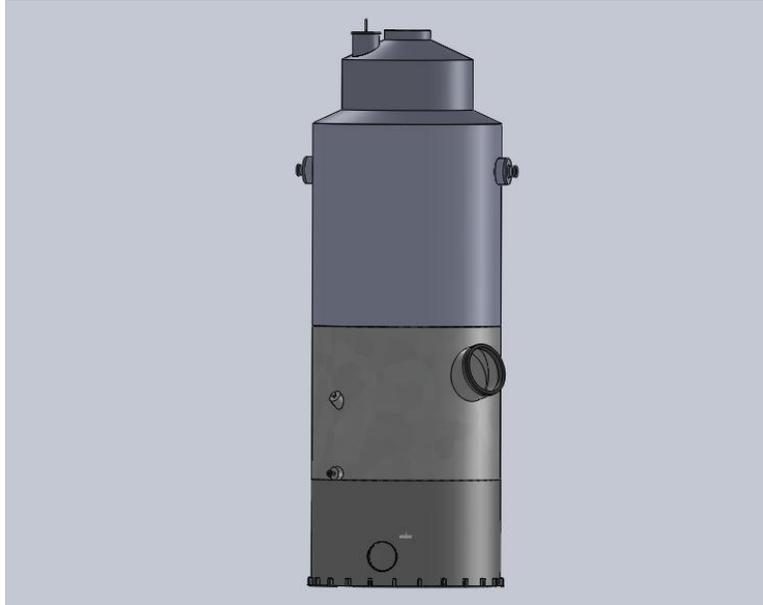
**Anexo 10.** Aplicación de penetrante en pieza de estudio luego de aplicar el limpiador o removedor.



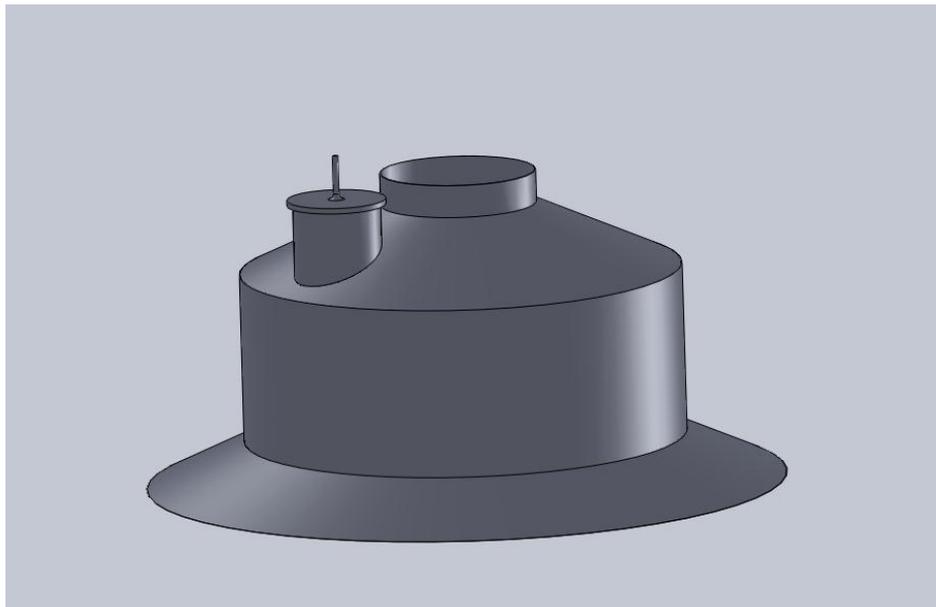
**Anexo 11.** Siguiete aplicación del removedor o limpiador.



**Anexo 12.** Aplicación del revelado.



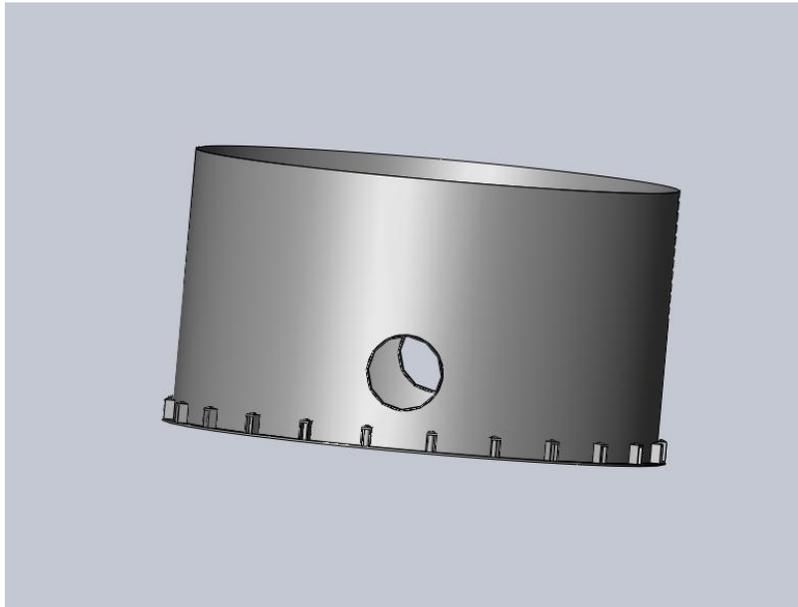
**Anexo 13.** Torre de absorción C-03.



**Anexo 14.** Torre de absorción C-03, cúpula superior.



**Anexo 15.** Torre de absorción C-03, cuerpo de la torre.



**Anexo 16.** Torre de absorción C-03, faldón.



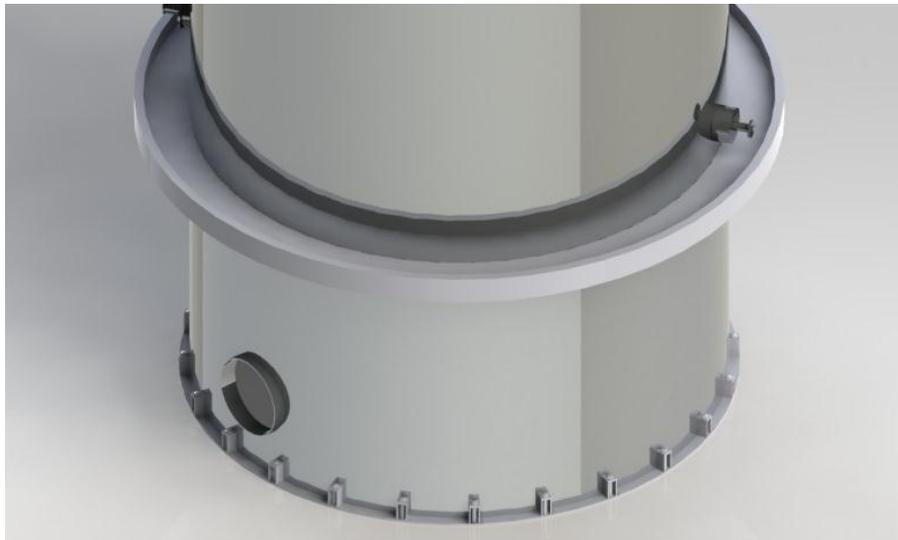
**Anexo 17.** Solución de alternativa N°1 en isometría.



**Anexo 18.** Solución de alternativa N°1 vista de acercamiento.



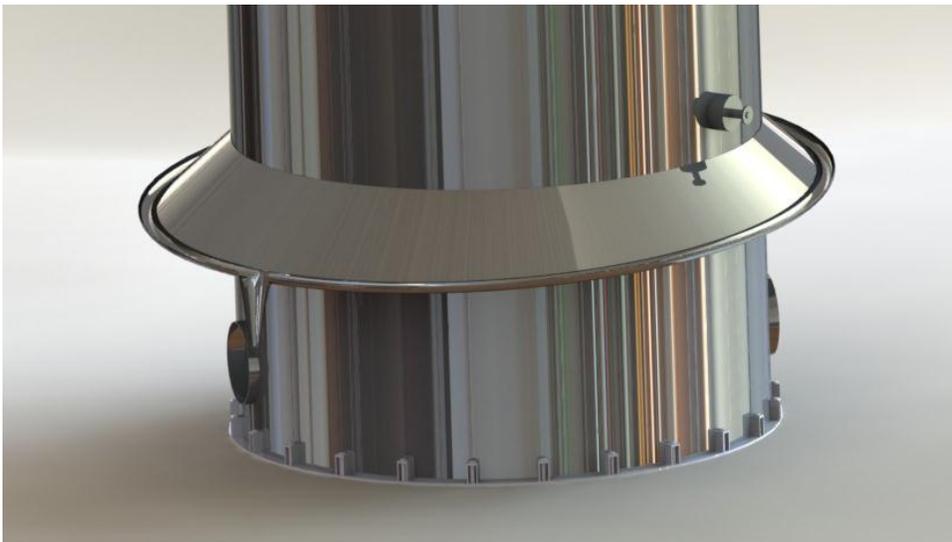
**Anexo 19.** Solución de alternativa N°2 en isometría.



**Anexo 20.** Solución de alternativa N°2, vista de acercamiento.



**Anexo 21.** Solución de alternativa N°3, isometría.



**Anexo 22.** Solución de alternativa N°3, vista de acercamiento.



**Anexo 23.** Vista frontal faldón de soporte.



**Anexo 24.** Vista lateral faldón de soporte.



**Anexo 25.** Vista lateral del manhole (boca de visita).



**Anexo 26.** Acceso a la parte interior del faldón.



**Anexo 27.** Parte interior del faldón.



**Anexo 28.** Pernos de Sujeción.

# *APÉNDICES*

---

# *Apéndice A*

## DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INSTALACIÓN 218

La producción comprende tres etapas principales:

- **Oxidación del azufre (Combustión)**

Azufre líquido y aire seco se llevan a un horno donde se realiza la combustión del azufre con el oxígeno contenido en el aire, bajo la siguiente reacción:



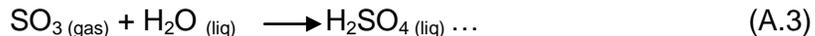
- **Oxidación catalítica de oxígeno de azufre (conversión de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>)**

El gas producido en el horno se enfría y se lleva al reactor. En 4 etapas, se produce la reacción entre el dióxido de azufre y el oxígeno en presencia de un catalizador a base de pentóxido de vanadio.



- **Absorción de Trióxido de azufre con ácido sulfúrico.**

El gas de salida del reactor, es absorbido con ácido sulfúrico al 98% en concentración en torres empacadas mediante un mecanismo de absorción con reacción.



A continuación se presenta una descripción más detallada del proceso dividido en las siguientes fases:

- a) Circuito de gas.
- b) Circuito de ácido sulfúrico
- c) Recuperación de calor.

a) *Circuito de gas*

Está formado por las siguientes etapas:

- Compresión de aire.
- Secado de aire.
- Combustión de azufre.
- Enfriamiento de los gases
- Conversión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- Enfriamiento de los Gases de SO<sub>3</sub>.
- Absorción de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>):
  - ❖ Absorción Intermedia
  - ❖ Absorción Final

Compresión de aire

El aire que alimenta a la planta entra al filtro FI-05 para retirar el material particulado presente. De allí pasa a la turbina TV-01 que alimenta al ventilador principal VV-01. El ventilador succiona el aire y lo descarga a una presión de 0,42 Kg/cm<sup>2</sup> (de diseño) y a una temperatura alrededor de los 60-70°C a la torre de secado C-01. Se dispone de la válvula mariposa HV-311 en la descarga del ventilador que permite regular la presión de salida del mismo.

Secado de aire

El aire descargado por el ventilador VV-01 entra a la Torre de Secado C-01 por la parte inferior. En la operación, el aire húmedo se pone en contacto (a contracorriente) con ácido sulfúrico al 96%, que entra a la torre a una temperatura de 45°C.

El ácido inyectado se pone en contacto íntimo con el aire mediante el dispositivo de relleno de la torre (sillas intalox). El aire seco sale por el tope de la torre, distribuyéndose en una línea principal y una secundaria. La línea principal de aire seco entra al cabezal del quemador de azufre (HB-01) para ser utilizado en la combustión del azufre líquido. La línea secundaria va al convertidor A-01 para ser utilizada como enfriamiento en la salida del segundo paso. El arrastre de ácido en la corriente de aire se elimina por medio de eliminadores de neblina. (Manual descripción de procesos Pequiven, 2007)

### Combustión de azufre

El azufre líquido se bombea desde la fosa de sedimentación hacia el tanque SR-01A; desde ahí es enviado, de forma atomizada, a través de la bomba PC-02 A/B a dos quemadores ubicados en el horno de combustión de azufre HB-01. La atomización del azufre líquido permite una mejor combustión del mismo, ya que mejora el contacto con el aire seco que viene del ventilador VV-01.

Aquí se hace reaccionar el azufre con el aire seco (en exceso), proveniente de la torre de secado, para producir dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) a una temperatura aproximada de 1.100-1.150°C. La producción de SO<sub>2</sub> está regida por el equilibrio adiabático de la temperatura de la llama en el quemador de azufre.



El quemador de azufre solamente consume parte del oxígeno que entra al horno. La composición del gas que sale del HB-01 está determinada por la relación molar aire/combustible (1,5/2,5 aire/azufre, por diseño) que se haya quemado. La temperatura y composición de los gases a la salida del horno que establece el diseño son:

SO <sub>2</sub>	12%
O <sub>2</sub>	9%
N <sub>2</sub>	79%
Temperatura	1.100-1.150°C

Los gases de combustión salen del quemador a través de un ducto, y se enfrían en la caldera de calor residual H-02B.

#### Enfriamiento de los Gases

Los gases de combustión se enfrían en la caldera de calor residual HB-02B, pasando a través de los tubos de la misma (piro tubular) e intercambiando calor con el agua desmineralizada proveniente del tambor de vapor SR-05, generando vapor de agua saturado.

La caldera posee un sistema de desviación de los gases de proceso, lo que permite controlar la temperatura de los mismos a la entrada del sobrecalentador F-09 alrededor de los 500°C. El sobrecalentador externo F-09 enfría la corriente de gases de combustión desde los 500°C hasta 430°C, a través de una corriente de vapor. Una vez ajustada la temperatura, los gases pasan al convertidor. (Manual descripción de procesos, Pequiven)

#### Conversión del Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

El Convertidor A-01 es el equipo que realiza la oxidación catalítica del dióxido de azufre, a través de un proceso de doble contacto. A diferencia de la instalación 215, el filtro encargado de retirar la ceniza y polvo presentes en la corriente de gas (FI-04) se encuentra por encima de la entrada a la primera etapa de la conversión.

Realizada la filtración, los gases libres de material particulado pasan a la primera etapa de conversión. La reacción que se verifica en el equipo es:



En la reacción se combina, de manera definida, el dióxido de azufre con cierta cantidad de oxígeno remanente para formar trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). La reacción se lleva a cabo en presencia de un catalizador de pentóxido de vanadio ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ). (Manual descripción de procesos, Pequiven)

El convertidor se encuentra dividido en cuatro (4) etapas independientes de catalizador:

1er. Lecho: el primer lecho de catalizador se encuentra debajo del filtro FI-04, y está ubicado en la parte inferior del convertidor. Los gases penetran a esta etapa a una temperatura aproximada de  $430^\circ\text{C}$ , oxidándose aproximadamente el 55% del  $\text{SO}_2$ , y aumentándose la temperatura de salida de los gases hasta  $615^\circ\text{C}$ . La temperatura de entrada al 1er. lecho se regula utilizando el desvío de los gases de la caldera H-02B. Actualmente éste se encuentra en modificación por lo que no está operativo. Para elevar la temperatura se abre el desvío; para bajarla se debe cerrar.

Se debe manipular con cuidado este desvío, ya que un pequeño cambio tiene un efecto inmediato en la temperatura de entrada del filtro. No debe permitirse que permanezca durante mucho tiempo una temperatura de salida del 1er. paso mayor a  $615^\circ\text{C}$ , ya que se pueden dañar las piezas del equipo.

2do. Lecho: los gases de salida del 1er. lecho salen del convertidor y pasan al equipo F-03, que es un intercambiador gas-gas de alta temperatura; aquí la corriente gaseosa se enfría hasta alcanzar una temperatura de  $435^\circ\text{C}$ . Luego de alcanzar esta temperatura

entran al 2do. lecho, ubicado en el tope del equipo A-01. La temperatura de salida de esta etapa es de unos 522°C. La conversión del SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub> que se alcanza en el lecho es de un 80% aproximadamente.

3er. Lecho: los gases de salida del 2do. lecho entran a la 3era. etapa, ubicada debajo de la 2da. Entre estos lechos, los gases calientes se enfrían con la ayuda de una corriente de aire frío, proveniente de la torre de secado de aire C-01. La conversión que se alcanza en esta etapa es del 91,5%. Los gases salen a una temperatura de 487°C.

4to. Lecho: los gases de salida del 3er. lecho salen del convertidor para enfriarse en el economizador F-02, alcanzando una temperatura de 200°C aproximadamente. La corriente gaseosa pasa a la sección de absorción intermedia (torre C-02); a la salida de la sección se calientan a través de los intercambiadores F-04 y F-05 (de baja y alta temperatura, respectivamente) y entran a la 4ta. etapa de conversión a una temperatura de 425°C. Se alcanza una conversión final de 99,7%, asegurando que se cumplan las regulaciones sobre contaminación ambiental. Los gases salen de esta etapa a 450°C.

#### Enfriamiento de los Gases de SO<sub>3</sub>.

Los gases de SO<sub>3</sub> que salen de la última etapa de conversión se enfrían en el evaporador F-01, alcanzando una temperatura aproximada de 350°C, incrementando la producción de vapor. Este gas se enfría posteriormente hasta 180°C en el intercambiador gas-gas de baja temperatura F-04, donde se calientan a su vez los gases provenientes de la torre de absorción intermedia C-02. Alcanzados los 180°C, la corriente gaseosa pasa a la última etapa de

producción de ácido sulfúrico. (Manual descripción de procesos Pequiven, 2007)

#### Absorción de Trióxido de Azufre (SO<sub>3</sub>).

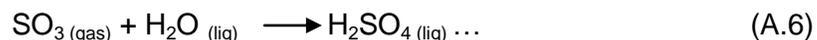
La absorción de SO<sub>3</sub> en la instalación 218 se realiza en dos etapas:

- Absorción intermedia.
- Absorción final.

#### Absorción intermedia:

La torre de absorción intermedia C-02 absorbe el trióxido de azufre formado en las tres primeras etapas de conversión, mediante el contacto a contracorriente con ácido sulfúrico al 98,5%.

Los gases que salen de la 3ra. etapa de conversión se enfrían en el economizador F-02 hasta los 200°C; parte de esta corriente se desvía hacia la torre de óleum C-04 donde es absorbido el SO<sub>3</sub> contenido en ella, el resto continúa hacia la torre de absorción intermedia y antes de entrar a la torre, la corriente se mezcla nuevamente con otra corriente gaseosa que proviene de la torre de óleum. El gas entra por la parte inferior de la torre C-02 y se ponen en contacto con una corriente de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98,5%. Durante el ascenso de los gases al tope de la torre el ácido sulfúrico absorbe el SO<sub>3</sub>, reaccionando con el agua contenida en el ácido, generando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

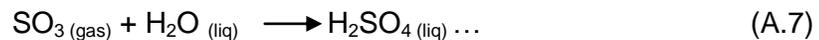


A la salida de la torre, el gas entra a la cuarta etapa de conversión pasando primero por un intercambiador gas-gas de baja temperatura F-04 y luego por el intercambiador gas-gas de baja temperatura F-03, en los cuales es calentado desde 70 hasta 450°C. El ácido que se produce por el proceso de absorción pasa por un proceso de ajuste de concentración, enfriamiento y recirculación.

Absorción final:

La torre de absorción final, C-03, absorbe el trióxido de azufre formado en la última etapa de conversión, mediante el contacto a contracorriente con ácido sulfúrico al 98%.

Los gases de la 4ta. etapa se enfrían en el evaporador F-01 hasta 350°C y luego, a través del intercambiador gas-gas de baja temperatura F-04, alcanzan una temperatura de 180°C para entrar a la torre de absorción C-03. La corriente entra por la parte inferior de la torre y se ponen en contacto con una corriente de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98%. El mecanismo de absorción del SO<sub>3</sub> es el mismo que se da en la absorción intermedia: los gases que ascienden por la torre se ponen en contacto con el ácido sulfúrico, absorbiendo el SO<sub>3</sub>:



Al igual que en la torre de absorción intermedia se produce un ajuste de concentración, un enfriamiento y una recirculación del ácido. El exceso recirculado en la torre de absorción final, correspondiente al exceso de ácido en el circuito completo de recirculación, es extraído como ácido de producción, el cual es enfriado hasta 40°C en el enfriador EA-05 y enviado a los tanques de almacenamiento SR-16/17/18. (Manual descripción de procesos Pequiven, 2007)

*b) Circuito de ácido y óleum.*

Sistema de ácido

El ácido que se forma en las torres de absorción C-02 y C-03 (absorción media y final), al igual que el utilizado en la torre de absorción C-01, pasan por un proceso de ajuste de concentración y temperatura para poder ser retornados al proceso. El H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en exceso que deja la torre de absorción final, y que corresponde al exceso en el circuito completo de recirculación, es extraído como ácido de producción.

### Sistema de óleum (ácido al 106 %)

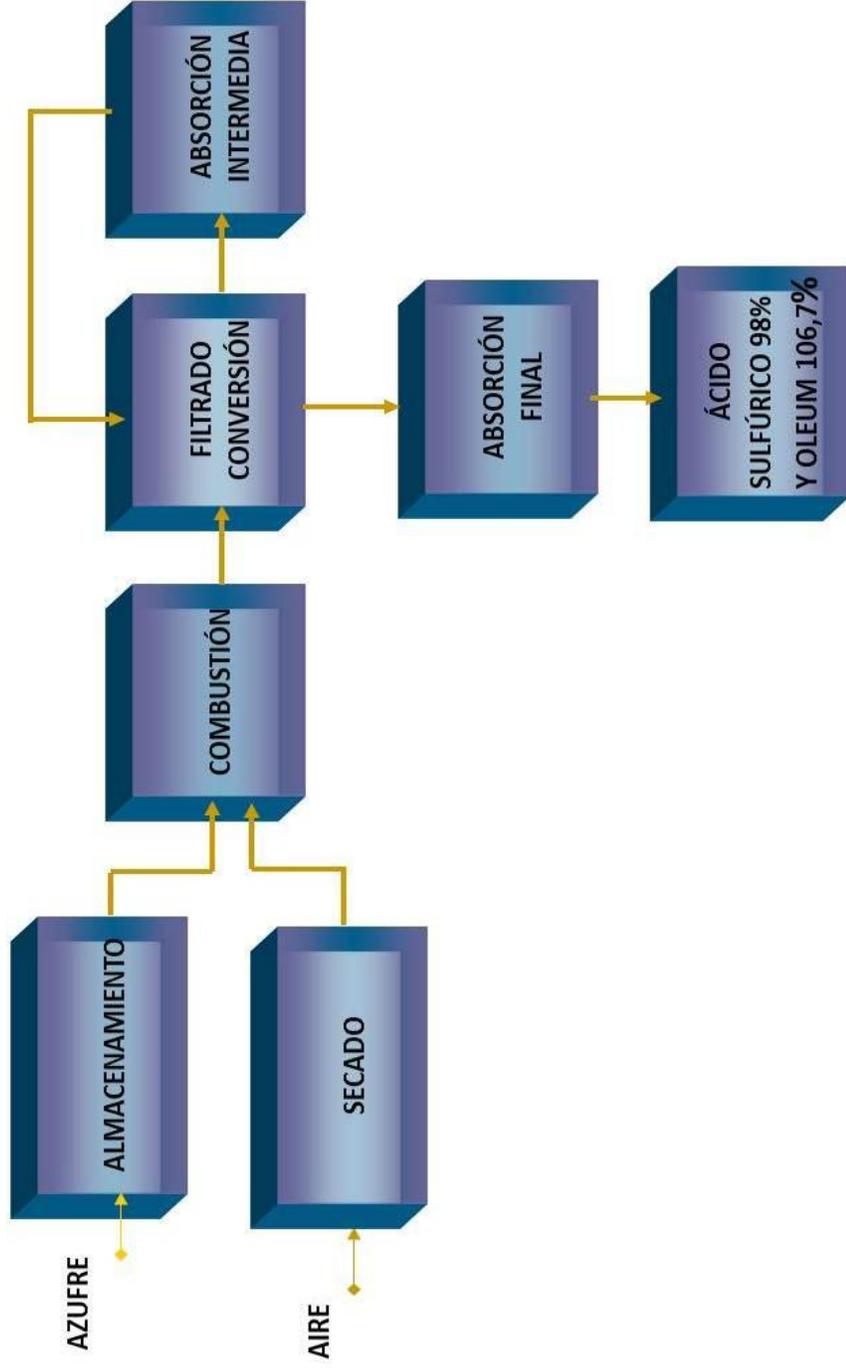
La formación de óleum, se lleva a cabo por la absorción del trióxido de azufre en una corriente de óleum recirculado a través de la torre de óleum C-04. La corriente gaseosa que sale de la 3ra. etapa del convertidor A-01 se enfría en el economizador F-02 y se desvía una parte de ésta, por medio de la válvula HV-309, hacia la torre de óleum C-04; aquí se pone en contacto a contracorriente con óleum recirculado. El óleum que sale de la torre se enfría en el equipo EA-04 y a recirculación, el exceso se extrae como producción y se envía a los tanques de óleum SR-19/20.

#### c) *Recuperación de calor.*

El enfriamiento del gas que proviene del horno H-01, antes de entrar a la primera etapa de conversión, se realiza en la caldera H-02B y el sobrecalentador F-09, donde se produce vapor a una presión de 30 Kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 400°C.

La caldera de recuperación se alimenta con agua desgasificada proveniente del tambor de vapor SR-04. Ésta se calienta inicialmente en el economizador F-02, donde el gas de la tercera etapa de conversión es enfriado. El calentamiento del agua de alimentación permite un ahorro de energía en la caldera y en el evaporador, ya que todo el calor que se suministra al agua se utilizará en la generación de vapor y no en el incremento de su temperatura. Por último, el evaporador se usa para enfriar el gas de proceso después de la última etapa de conversión, y se utiliza para generar un vapor adicional al producido por la caldera.

El evaporador F-01 está conectado directamente al tambor de vapor de la caldera SR-05. El vapor saturado generado en el evaporador y en la caldera se sobrecalienta en el sobrecalentador F-09 y se envía a la red interna de la planta. (Manual descripción de procesos Pequiven, 2007)



**Figura A.1** Esquema del proceso Instalación 218.

(Manual descripción de procesos Pequiven, 2007)



# *Apéndice B*

Informe N°1  
04 de Enero de 2010

Planta Ácido Sulfúrico, Instalación 218 – Torre C-03.

Razones de la inspección y/o evaluación.

Confiabilidad operacional.

Metodología Aplicada:

- Inspección visual.

Resultados:

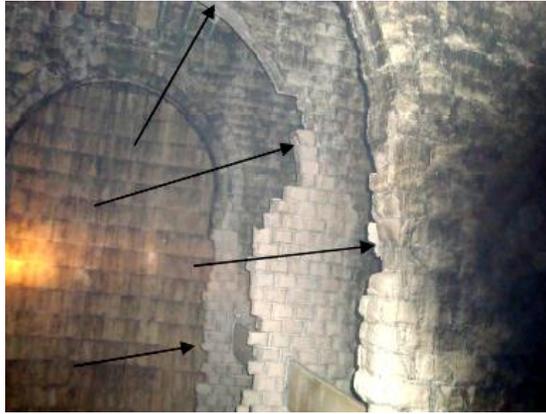
Durante la inspección parcial realizada a la bóveda de la torre C-03, a través de fotografías tomadas desde la parte superior interna del ducto F04/C03, se pudo apreciar lo siguiente:

- Desprendimiento del 60% del portal de ladrillo ubicado en la parte central lado norte de la bóveda de la torre. (ver figura B.1)



**Figura B.1** Desprendimiento del portal de ladrillos.

- Desprendimiento localizado de secciones de ladrillos en los portales lado sur y parte superior del arco central de la bóveda de la torre. (ver figura B.2)



**Figura B.2** Desprendimiento parcial del enladrillado.

- Obstrucción del filtro del sistema de succión de la torre y colector de alimentación de las bombas PC05A/B. (ver figura B.3)



**Figura B.3** Obstrucción con ladrillos.

- Se observó desprendimiento de las barra rigidizadoras de los portales de ladrillos desprendidas. (ver figura B.4)



**Figura B.4** Desprendimiento de las barras cerámicas de equilibrio entre los portales.

Conclusiones y/o recomendaciones:

- Renovar 100% enladrillado interno de la torre según plano de la torre C-03 N° 218-A-3-00236.
- Realizar un estudio por parte de Ingeniería de Instalaciones, para la instalación de la tapa superior del filtro del sistema de descarga de la torre, para evitar que posibles desprendimientos de ladrillo se introduzcan a través del mismo.
- Realizar un estudio por parte de Ingeniería de Instalaciones, para instalar una sección bridada en la parte inferior del colector de  $\varnothing 14''$  de la torre, con la finalidad de permitir la maniobra de remoción del mismo, ya que en la actualidad está compuesto por una sola pieza.
- Realizar un estudio por parte de Ingeniería de Instalaciones, para la instalación de nuevos filtros ubicados a través de la línea de alimentación del sistema de distribución de las bandejas.

Informe N°2  
23 de Agosto de 2010

Planta Ácido Sulfúrico, Instalación 218 – Estructura Metálica C-02, C-03 y C-04.

Razones de la inspección y/o evaluación.

Requerimiento de inspección para el mantenimiento o reemplazo de las estructuras metálicas.

Metodología Aplicada:

- Inspección Visual Externa.
- Prueba del martillo.

Resultados:

- La plataforma de acceso a las torres C-02, C-03 y C-04 presenta corrosión severa localizada y desprendimiento localizado de material. También se observó corrosión severa en los ángulos rigidizadores de 3 pulg. de la estructura soporte.
- Los peldaños de ángulos de 1 ½ pulg. presentan corrosión severa localizada.
- Las vigas UPN 200 de los soportes de la escalera de acceso a la plataforma presentan corrosión severa localizada.
- La estructura soporte de la plataforma fabricada de viga HPN 200 presenta corrosión severa localizada en la parte inferior de la estructura.
- La viga IPN 200 vista horizontalmente presenta perforaciones localizadas.
- Las rejillas de las plataformas presentan pérdida localizada de material base. Algunas de estas rejillas se observan deformadas.

Conclusiones y/o recomendaciones:

- Reemplazar la estructura metálica de la plataforma de acceso a la torre C-02, C-03 y C-04 la cual presenta corrosión severa localizada.
- Fabricar los soportes de la estructura metálica, anclada a la base de concreto.

Informe N°3  
05 de Octubre de 2010

Planta Ácido Sulfúrico, Instalación 218 – Torre C-03

Razones de la inspección y/o evaluación.

Requerimiento de inspección

Metodología Aplicada:

- Inspección Visual
- Inspección Termográfica
- Registro fotográfico

Resultados:

- La torre presenta externamente numerosas reparaciones localizadas de diferentes áreas en las paredes de la misma, producto de correcciones de fugas de ácido, debido a daños en el refractario interno.
- La torre presenta pérdida severa de material en puntos localizados del faldón de la torre.

Conclusiones y/o recomendaciones:

Cuerpo de la Torre

- En vista de las numerosas reparaciones ya efectuadas de acuerdo a las recomendaciones indicadas por los reportes termograficos efectuados en fechas anteriores y donde los puntos calientes son más frecuentes, lo cual, representa un mayor costo de reparación por inyección de teflón y paradas no programadas, se recomienda renovar la sección de la torre por debajo de la placa porta filtro.
- Realizar un estudio de factibilidad de sustitución de material por parte de Ingeniería de Instalaciones para el reemplazo del cuerpo de la torre con la finalidad de no usar refractario interno en la misma.

## Faldón de la Torre

- Renovar secciones de lámina del faldón. Utilizar lámina ASTM A 285 Grado C de 13mm de espesor. Soldar según procedimiento N° 1 del manual de Soldadura de Servicios Técnicos.
- Realizar limpieza SSPC SP6 internamente y externamente al faldón y aplicar pintura según manual de Servicios Técnicos.

Informe N°4  
11 de Noviembre de 2010

Planta Ácido Sulfúrico, Instalación 218 – Torre C-03

Razones de la inspección y/o evaluación.

Parada programada de la planta.

Metodología Aplicada:

- Inspección visual externa.
- Mediciones de espesores con ultra sonido.

Resultados:

Luego de llenado la torre con ácido de proceso, para realizar prueba con el mismo sistema de producción, se pudo apreciar fuga de ácido en los siguientes puntos:

- Indicios de fuga en forma de sulfato en 5 puntos de la soldadura de sellado de los parchos instalados a solape y a tope en la parte intermedia, lado noroeste de la carcasa de la torre, debido al agrietamiento que se presenta. (ver figura B.5)



**Figuras B.5** Fugas de ácido en la sección de soldaduras de las láminas instaladas a tope.

- Fugas en tres (3) puntos de soldaduras ubicadas en el lado norte parte intermedia de la carcasa, las cuales se apreciaron por el abombamiento y remoción de la resina adherida en esas superficies.
- Se aprecia fuga por la soldadura de unión de la manga ubicada en el lado sur-este de la carcasa de la torre, específicamente por el desprendimiento de la resina adherida sobre esa superficie. (ver figura B.6)



**Figura B.6** Fuga por la soldadura de unión de la manga.

- Espesor nominal de esa sección de la carcasa es de 11mm según el plano de diseño N° 218-A-3-00104. Nota: Se puede apreciar que existe una reducción de espesor, lo que indica la existencia de ataque químico por daños del refractario interno.

#### Conclusiones y/o recomendaciones:

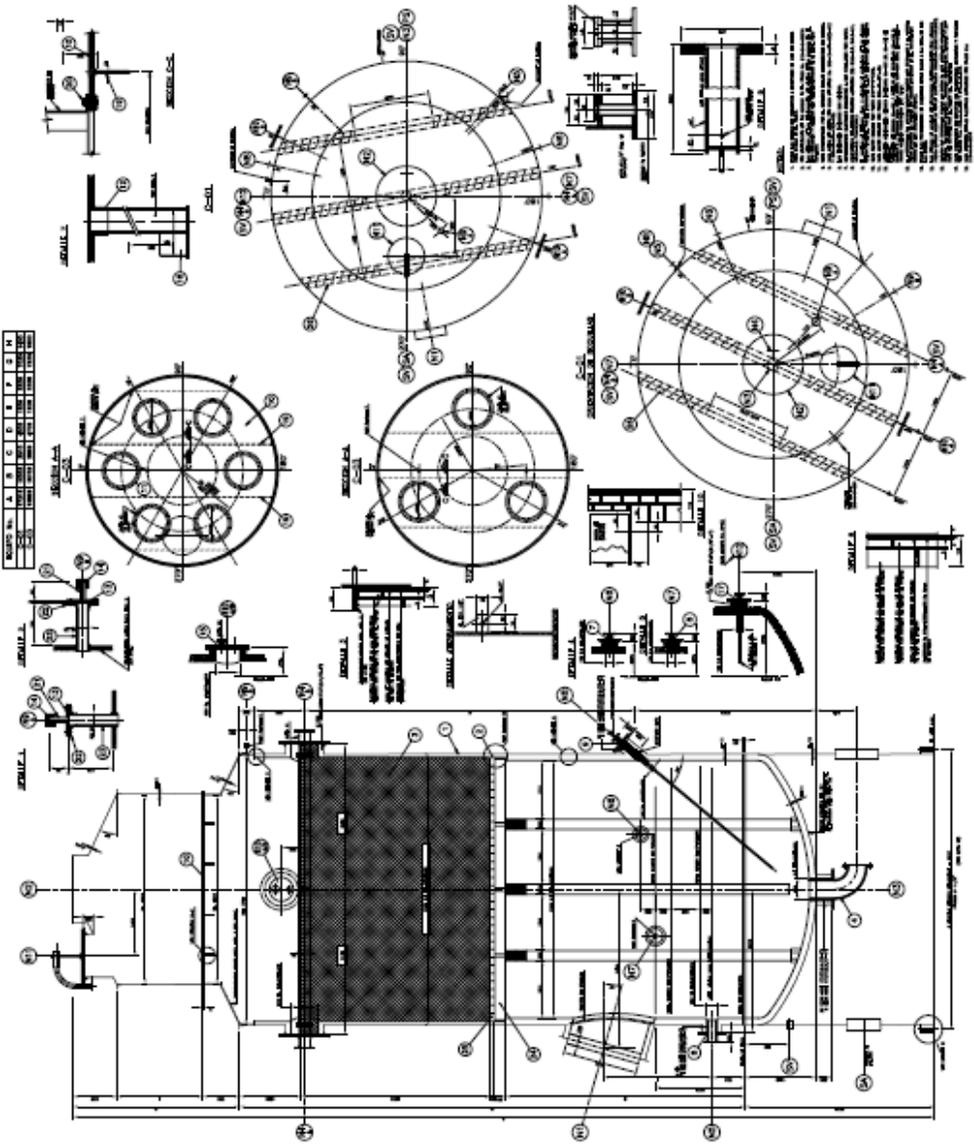
- Realizar los trabajos de corrección de las fugas existentes en diferentes secciones de soldaduras de la carcasa de la torre
- Debido a los bajos espesores existentes en los dos nuevos parchos instalados a solape por presentar fuga al momento de llenar la torre con ácido, se debe reparar esta sección

- Rellenar las aberturas o perforaciones localizadas de la zona del enladrillado. Utilizar cemento refractario de Silicato de Potasio.
- Aplicar friso de cemento refractario de Silicato de Potasio en toda la superficie del enladrillado para sellar filtraciones a través de los mismos.
- Instalar una nueva lámina con las dimensiones del parcho removido soldado a tope (ver procedimiento de preparación de la lámina a instalar). Utilizar lámina ASTM A 283 Grado C de 11mm de espesor y con los bordes redondeados con curvatura de 3 pulgadas. Soldar según WPS S-120202002 del manual de soldadura de Servicios Técnicos.
- Instalar los conectores colocados a  $<45^\circ$  y ubicados cada 15cm tanto hacia los laterales como hacia arriba, en ambos extremos del cordón de soldadura. Los mismos deben ir alojados en una perforación realizada previamente con un taladro, y posteriormente soldados con soldadura a filete según procedimiento N° 1 del manual de soldadura de Servicios Técnicos.

# *Apéndice C*



NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----



NO.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									
57									
58									
59									
60									
61									
62									
63									
64									
65									
66									
67									
68									
69									
70									
71									
72									
73									
74									
75									
76									
77									
78									
79									
80									
81									
82									
83									
84									
85									
86									
87									
88									
89									
90									
91									
92									
93									
94									
95									
96									
97									
98									
99									
100									

NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

# *Apéndice D*



500 Green Street  
Washington, PA 15801

CERTIFIED MATERIAL  
TEST REPORT

MECS IRC  
SYSTEMS INC/CRP POINT  
P O BOX 14547  
SAINT LOUIS MO 63178

OUR ORDER NO.  
YOUR ORDER NO.  
MEMO NO.  
DATE  
SALESMAN NO.

3-20-74  
2-16-74  
3-22-74  
3-27-74  
3-31-74

*for M. Xenakis*  
D. M. XENAKIS - Director, Chemicals Quality Assurance

GL 1002  
HRAP  
ASME SA240 A05  
REV 3 DTD 12/15/96  
UN5 538815

Heat	C	PM	P	S	SI	MI	CR	HD	CU	N	AL
514215105	-012	.554	.021	.0022	5.87	16.38	13.58	1.01	1.00	.008	.149
514215105	11022	A	208407		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11026	A0A	208315		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11027	A0B	208315		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11028	A0A	208329		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11029	A0B	208330		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11030	A0B	208317		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11025	A0B	208401		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11033	A0B	208446		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11032	A0C	208441		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11064	A0B	208439		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11031	A0C	208448		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11056	A0A	208454		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11096	A0B	208454		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11095	A0C	208454		72.0000	240.0000					1217 6 MM
514215105	11072	A0A	208398		72.0000	240.0000					1580 8 MM
514215105	11072	A0B	208398		72.0000	240.0000					1580 8 MM
514215105	11073	A0A	208398		72.0000	240.0000					1580 8 MM
514215105	11073	A0B	208457		72.0000	240.0000					1580 8 MM
514215105	11075	A0A	208469		72.0000	240.0000					1580 8 MM
514215105	11075	A0B	208471		72.0000	240.0000					1580 8 MM
514215105	11099	A0B	208457		72.0000	240.0000					1580 8 MM

IS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS  
FEDERAL LAW TESTING WAS PERFORMED AT ALC WASTON AND BOWEN TESTS APPLICABLE TO THE COMPANY THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS  
XERO COPYING OF THIS REPORT IS PROHIBITED. ANY VIOLATION OF THIS PROHIBITION WILL BE PROSECUTED TO THE FULL EXTENT OF THE LAW. THE COMPANY IS NOT RESPONSIBLE FOR THE  
LEATHERY AND/OR PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S, BY COMBUSTION; P, Q, BY ICP; NI, V, CO, Cr, BY WDTRE; BY CES, AL AND TI (-0.01%)  
WDTRE, OTHERWISE BY CES, PB, SI, AG BY GFA.



Allegheny Technologies  
 Sells The ROBERTS COMPANY  
 TO  
 133 FURLINES RD  
 MEMPHISVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15201

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

MEUS INC  
 SYSTEMS INC/ CORP POINT  
 P O BOX 14547 ACT PAY  
 SAINT LOUIS MO 63178

OUR ORDER NO.  
 YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

*Joe M. Xenakis*  
 D. M. KENAROS - Director, Corporate Quality Assurance

Heat	C	MM	P	S	SI	NI	DR	HQ	CU	N	AL
514213103	.012	.586	.021	.0002	5.89	16.38	13.58	1.01	1.00	.005	.149
514249103	.012	.783	.037	.0001	5.82	16.27	13.63	.991	.996	.006	.077
514249102	.010	.784	.027	.0001	5.79	16.26	13.63	.993	.995	.006	.104
514269103	.011	.787	.023	.0001	5.81	16.31	13.62	.993	.999	.006	.103
514280105	.011	.542	.023	.0001	5.88	16.33	13.61	1.02	1.01	.006	.116
514271102	.009	.542	.022	.0001	5.81	16.22	13.49	1.00	.985	.005	.127
514371104	.009	.543	.021	.0001	5.78	16.17	13.47	1.00	.981	.005	.143
514364101	.010	.55	.023	.0003	5.78	16.22	13.48	1.01	.96	.006	.13
514364102	.008	.56	.022	.0003	5.75	16.01	13.41	1.05	.87	.0035	.16
514364103	.004	.57	.021	.0003	5.83	16.13	13.45	1.04	.98	.0063	.13
514364103	.007	.56	.022	.0003	5.79	16.03	13.42	1.04	.97	.0058	.13
514366103	.017	.55	.021	.0001	5.73	16.12	13.49	1.00	.95	.007	.18

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Hardness	Reid	Corrosion
208319	.2362	TRANS	ANNEAL	45.8 KSI	108.0 KSI	59.0	RH189		5
208323	.2362	TRANS	ANNEAL	51.5 KSI	107.0 KSI	64.0	BH194		5
208330	.2362	TRANS	ANNEAL	53.5 KSI	108.0 KSI	62.0	BH204		6
208317	.2362	TRANS	ANNEAL	49.4 KSI	106.0 KSI	65.0	BH179		5
208401	.2362	TRANS	ANNEAL	57.5 KSI	110.0 KSI	59.0	BH212		5
208401	.2362	TRANS	ANNEAL	53.0 KSI	103.0 KSI	62.0	BH193		5

PAGE 2 CONTINUE ON PAGE 3

THIS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS PER FEDERAL LAW. TESTING WAS PERFORMED AT ALC HANCOCK AND ISOCEC TESTS APPROVED LABORATORIES LOCATED AT NAVYON HEIGHTS, BRACKENRIDGE, LANAROE, MIDLAND, AND LESCHBURG, PA FACILITIES OR A NAVYON AND ALC TESTS APPROVED LABORATORY IN 1034-31 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE SECTION VIII DIVISION 1 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE (PED) 97/23/EC. ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION; PHOSPHORUS, P, SI, CU, NI, MO, CU, CR, CO, V BY WETTED FUSION; THERMAL CONDUCTIVITY, MN, P, SE, CR, NI, MO, CU, CR, CO, V BY WETTED BY OES, AL AND TI (-0.10%) BY WETTED OTHERWISE BY OES, AR, BI, AG BY GFAA.



Allegheny Technology  
 Company  
 133 E. PLAINFIELD RD  
 MONROEVILLE, PA

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

OUR ORDER NO.  
 YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

157-1575  
 157-1575  
 157-1575  
 05/01/2009-03/25/2009  
 598

*Fre M. Xenakis*  
 D. KENNEDY - Director, Customer Quality Assurance

MECS INC  
 SYSTEMS INC./CORP POINT  
 P O BOX 14547 ACT PAY  
 SAINT LOUIS MO 63178

Lot #	Gauge	Cond	Test	Field Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion	S
208446	.2362	TRANS	ANNEAL	45.9 KSI	103.0 KSI	68.0	61.0	BHN183			6
208441	.2362	TRANS	ANNEAL	47.0 KSI	105.0 KSI	68.0	62.0	BHN187			6
208439	.2362	TRANS	ANNEAL	47.0 KSI	103.0 KSI	67.0	63.0	BHN187			6
208448	.2362	TRANS	ANNEAL	51.0 KSI	109.0 KSI	60.0	56.0	BHN192			7
208454	.3125	TRANS	ANNEAL	46.1 KSI	104.0 KSI	68.0	65.0	BHN183			6
208350	.2362	TRANS	ANNEAL	51.5 KSI	108.0 KSI	65.0	57.0	BHN185			7
208467	.3125	TRANS	ANNEAL	52.0 KSI	109.0 KSI	58.0	55.0	BHN196			7
208457	.3125	TRANS	ANNEAL	50.5 KSI	107.0 KSI	56.0	57.0	BHN189			7
208468	.3125	TRANS	ANNEAL	53.5 KSI	112.0 KSI	50.0	58.0	BHN194			7
208471	.3125	TRANS	ANNEAL	51.0 KSI	107.0 KSI	64.0	58.0	BHN195			7
208437	.3125	TRANS	ANNEAL	47.4 KSI	101.0 KSI	70.0	67.0	BHN177			4

SIN EN 10204:2005 2.1 CERTIFICATE  
 MATERIAL IS OF USA HELL AND MANUFACTURE  
 MATERIAL WAS PRODUCED WITHOUT KNOWN CONTACT WITH MERCURY  
 MATERIAL WAS NOT MELT-REPROCESSED

THIS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. RECORDS OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THIS CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS  
 PER FEDERAL LAW. TESTING WAS PERFORMED AT ALC NADCAP AND ISO 9001 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT MATKOMA HEIGHTS, BRICKERIDGE, LANTANA, AND LEECHBURG, PA FACILITIES OR A MAJOR AND  
 WHICH ARE ACCREDITED LABORATORY EN 10604 - 3.1 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO ASME B74.100 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE 97/23/EC.  
 ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION; PHOSPHORUS, P, S, CR, NI, MO, CU, CO, V, BY WAXE BEBY OBS. AL AND TI (6-10-104)  
 \*WHICH OTHERWISE BY OBS. CR, NI, MO, CU, CO, V, BY WAXE BEBY OBS. AL AND TI (6-10-104)



Allegheny Technologies  
**ATI Allegheny Ludlum**  
 To: THE ROBERTS COMPANY  
 133 FURLINES RD  
 MINIERVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

MECS, INC  
 SYSTEMS INC./CORP POINT  
 P O BOX 14547  
 SAINT LOUIS MO

**CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT**

ACT FAY  
 ACT FAY  
 63178

OUR ORDER NO.  
 YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

*Joe M. Xenakis*  
 Joe M. Xenakis - Director, Composite Quality Assurance

AL 802  
 ASTM A240 07 ASME SA240 025  
 ZELOR 417-209 REV 3 DTD 12/15/06  
 ASTM A480-04

HRAP  
 UNS E38815

Heat	Slip	Lot No	Size	Weight	Pcs
513845103	03032 A	205462	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
513846103	03018 B	205478	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
513846103	03018 C	205494	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
513846104	03017 A	205411	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
513846103	03034 A	205479	72.0000 x 240.0000	1.592 8 MM	1
514197103	03013 A	205458	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514197103	03013 B	205485	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514197103	03015 A	205497	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514197103	03015 B	205407	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514197103	03029 B	205609	72.0000 x 240.0000	1.592 8 MM	1
514204101	03015 A	205481	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204101	03016 B	205481	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204101	03016 C	205411	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204101	03030 A	205608	72.0000 x 240.0000	1.592 8 MM	1
514204101	03030 E	205608	72.0000 x 240.0000	1.592 8 MM	1
514204102	03009 A	205471	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204102	03009 B	205471	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204102	03009 C	205471	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204102	03023 B	205493	72.0000 x 240.0000	1.592 8 MM	1
514204103	03006 A	205484	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204103	03006 B	205484	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204103	03006 C	205484	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204104	03007 A	205467	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204104	03007 B	205467	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1
514204104	03007 C	205467	72.0000 x 240.0000	1.217 6 MM	1

ALLEGHENY LUDLUM PREFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION/INFRARED; N, O, H BY INERT FUSION/THERMAL CONDUCTIVITY; MN, P, SI, CR, NI, MO, CU, CR, CO, V, BY WDXRF; B, OES, AL AND Ti (6-0.10%) BY WDXRF; OTHERWISE BY OES, P, B, AG BY GPFA

THIS CERTIFICATE OF TEST STATEMENT & CHEMISTRY STATEMENT  
 IS PUNISHED AS A FELONY UNDER FEDERAL LAW. TESTING WAS PERFORMED AT ALL INDUSTRY APPROVED LABORATORIES LOCATED AT NATIONAL HEIGHTS, BRICKERIDGE, LATHROP, MIDLAND, AND LEECHBURG,  
 FACILITIES OR A WAREHOUSE AND ISOMET 17029 ACCREDITED LABORATORY IN 1024 - 31 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURED ACCORDING TO ASTM A240 AND THE PRESSURE EQUIPMENT  
 REGULATORY CODE 9/2383 E.

EXCEPT AS OTHERWISE NOTED, THIS MATERIAL HAS BEEN MANUFACTURED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND  
 RESULTS CONFORM TO THE SPECIFICATION AND ORDER REQUIREMENTS.

PAGE 1 CONTINUE ON PAGE 2



Allegheny Technologies  
 SHIP THE HERTZ COMPANY  
 TO 133 FORLINES RD  
 WINSTON-SALEM NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

OUR ORDER NO.  
 YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

10745 880  
 116-2352  
 523624-00  
 01/31/2008-01/29/2008  
 508

*Joe M. Xenakis*  
 D. M. XENAKIS Director, Corporate Quality Assurance

MECS INC  
 SYSTEMS INC/CORP POINT  
 P O BOX 14947  
 SAINT LOUIS MO 63118

ZR590

Heat	Slip	C	PH	P	S	SI	NI	CR	MO	CU	N	AL
514204104	03007	C	546	018	0001	8.89	16.19	13.35	.971	.939	.007	.119
514204104	03021	A	015	018	0002	9.86	16.19	13.33	.977	.94	.0063	.14
514204104	03021	B	013	020	0003	9.91	16.12	13.38	1.05	.93	.005	.14
514204103	03022	A	009	019	0001	9.92	16.10	13.43	1.04	.928	.006	.143
514204103	03022	B	017	020	0003	9.65	15.86	13.37	.96	.97	.0012	.18
514204103	03022	B	016	021	0004	9.82	16.18	13.44	.98	.99	.0002	.12
514204103	03023	A	013	023	0003	9.65	16.05	13.60	.95	.97	.0056	.13
514204103	03023	B	016	023	0008	9.59	15.99	13.59	.94	.96	.006	.15
514204104	03014	A	014	023	0004	9.64	16.07	13.63	.95	.97	.0052	.12
514204103	03015	B	015	023	0004	9.64	16.07	13.61	.95	.97	.005	.13

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield	Tensile	Elong	Red. of	Hardness	Bend	Corrosion
203452	.2362	TRANS	ANNEAL	47.8 KSI	105.0 KSI	64.0	64.0	BHN190		6
203478	.2362	TRANS	ANNEAL	47.6 KSI	107.0 KSI	64.0	62.0	BHN193		7
203494	.2362	TRANS	ANNEAL	48.3 KSI	105.0 KSI	65.0	60.0	BHN187		5

THIS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL OR IN PART WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. RECORDS OF THESE TESTS SHALL BE MAINTAINED FOR THE LIFE OF THE PRODUCT. FOR FURTHER INFORMATION ON THE CERTIFICATE OF TESTS, CONTACT THE QUALITY CONTROL DEPARTMENT OF THE COMPANY. THESE TESTS WERE PERFORMED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND REQUIREMENTS. THE TESTS WERE PERFORMED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND REQUIREMENTS. THE TESTS WERE PERFORMED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND REQUIREMENTS. THE TESTS WERE PERFORMED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND REQUIREMENTS.

LEHIGH LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION; H, N, O, H BY INERT FUSION; THERMAL CONDUCTIVITY: MM, P, SI, CR, NI, MO, CU, CB, CO, V, BY WIRE BE  
 DES, AL AND Ti (6-8.0%) BY WIRE, OTHERWISE BY DES, P, B, AS BY DES.  
 CERTIFICATE OF TEST STATEMENT & CHEMISTRY STATEMENT  
 THIS MATERIAL HAS BEEN MANUFACTURED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND  
 RESULTS CONFORM TO THE SPECIFICATION AND ORDER REQUIREMENTS.



500 Green Street  
Washington, PA 15301

MECS INC  
SYSTEMS INC/ CORP POINT  
P O BOX 14547  
SAINT LOUIS MO

CERTIFIED MATERIAL  
TEST REPORT

POINT  
ACT PAY  
-63178

28390

OUR ORDER NO.  
YOUR ORDER NO.  
MEMO NO.  
DATE  
SALESMAN NO.

01/31/2003-01/31/2008

SOB

*Joe M. Xenakis*  
Director, Corporate Quality Assurance

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion	B
205477	.3150	TRANS	ANNEAL	53.5 KSI	111.0 KSI	46.0	53.0	BHN219			7
205488	.2362	TRANS	ANNEAL	45.0 KSI	102.0 KSI	70.0	67.0	BHN184			7
205407	.2362	TRANS	ANNEAL	46.9 KSI	102.0 KSI	70.0	64.0	BHN184			4
205609	.3150	TRANS	ANNEAL	46.2 KSI	102.0 KSI	70.0	62.0	BHN184			5
205481	.2362	TRANS	ANNEAL	46.8 KSI	101.0 KSI	70.0	68.0	BHN179			5
205411	.2362	TRANS	ANNEAL	44.7 KSI	100.0 KSI	70.0	69.0	BHN177			5
205608	.3150	TRANS	ANNEAL	50.5 KSI	109.0 KSI	62.0	60.0	BHN207			8
205471	.2362	TRANS	ANNEAL	47.7 KSI	100.0 KSI	70.0	63.0	BHN179			4
205493	.3150	TRANS	ANNEAL	45.2 KSI	100.0 KSI	70.0	68.0	BHN177			5
205484	.2362	TRANS	ANNEAL	46.5 KSI	100.0 KSI	70.0	63.0	BHN178			4
205467	.2362	TRANS	ANNEAL	48.0 KSI	100.0 KSI	74.0	63.0	BHN183			4
205461	.3150	TRANS	ANNEAL	45.2 KSI	102.0 KSI	70.0	66.0	BHN177			5
205474	.3150	TRANS	ANNEAL	49.2 KSI	109.0 KSI	61.0	66.0	BHN181			5

THIS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL OR PART WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE INFORMATION ON THIS CERTIFICATE MAY BE PENALIZED AS A FRAUD UNDER FEDERAL LAWS. TESTING WAS PERFORMED AT THE METROLOGICAL SERVICES, 17025 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT NATIONAL HEAVY INDUSTRIES, MILWAUKEE, WISCONSIN. THE HEAVY LUDLUM PERFORMANCE CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: N, O, H BY INERT FUSION; THERMAL CONDUCTIVITY, MV, P, SI, CR, NI, MO, CU, CO, V, BY WDXRF; B, CES, AL, AND Ti (6-8.10%) BY WDXRF; OTHERWISE BY CES, Pb, Bi, Ag BY GFAA. CERTIFICATE OF TEST STATEMENT & CHEMISTRY STATEMENT RESULTS CONFORM TO THE SPECIFICATION AND ORDER REQUIREMENTS.



500 Green Street  
Washington, PA 15301

CERTIFIED MATERIAL  
TEST REPORT

YOUR ORDER NO.  
MEMO NO.  
DATE  
SALESMAN NO.

MECS INC.  
SYSTEMS INC./CORP POINT  
P O BOX 14347  
SAINT LOUIS MO 63178

28590

37264904  
22976433  
37264904  
01/31/2005-01/27/2006  
508

*See M. Xenakis*

D. M. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion	S.
205466	.3150	TRANS	ANNEAL	47.1 KSI	101.0 KSI	69.0	68.0	BH176			6

DIN EN 10204:2005 3.1 CERTIFICATE  
MATERIAL IS OF USA MELT AND MANUFACTURE  
MATERIAL WAS PRODUCED WITHOUT KNOWN CONTACT WITH MERCURY  
MATERIAL WAS NOT MELT REPAIRED

THIS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY PUNISH AS A FELONY UNDER FEDERAL LAW. TESTING WAS PERFORMED AT THE COMPANY'S OWN FACILITIES OR AT APPROVED LABORATORIES LOCATED AT PITTSBURGH, BRACKENRIDGE, LATHROP, MIDLAND, AND LEGG. TESTING FACILITIES OR A FACILITY AND ISO/IEC 17025 ACCREDITED LABORATORY, EN 10204-3.1 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO ASTM A1011 AND THE PRESSURE EQUIPMENT REGISTERS. ACTIVE PFD 97238EC.

ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION; INFRARED, N, O, H BY INERT FUSION; THERMAL CONDUCTIVITY, MK, P, SI, CR, NI, MO, CU, CO, V, BY WDXRF; P, CR, AL, AND Ti by 0.009 by WDXRF, OTHERWISE BY OES, PB, BI, AS BY GFA.

CERTIFICATE OF TEST STATEMENT & CHEMISTRY STATEMENT  
EXCEPT AS OTHERWISE NOTED, THIS MATERIAL HAS BEEN MANUFACTURED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND RESULTS CONFORM TO THE SPECIFICATION AND ORDER REQUIREMENTS.



Allegheny Technologies  
 THE ROBERTS COMPANY  
 133 FERRINES RD  
 WINTERTVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

NECS INC  
 SYSTEMS INC./CORP POINT  
 P O BOX 14347  
 SAINT LOUIS MO 63178

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

150210000  
 220-60000  
 38634-00  
 01/21/2005-01/27/2006  
 508

*See M. Xenki*  
 D.M. XENKIS - Director, Corporate Quality Assurance

28599

Lot No	Gauge	Coil	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion S.	Gr
205466	3150	TRANS	ANNEAL	47.1 KSI	101.0 KSI	69.0	68.0	RHN176			6

DIN EN 10204:2003 3.1 CERTIFICATE  
 MATERIAL IS OF USA MELT AND MANUFACTURE  
 MATERIAL WAS PRODUCED WITHOUT KNOWN CONTACT WITH MERCURY  
 MATERIAL WAS NOT WELD REPAIRED

THIS CERTIFICATE SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THIS CERTIFICATE MAY  
 PUNISH AS A FELONY UNDER FEDERAL AND STATE LAWS. THIS CERTIFICATE IS VALID ONLY FOR THE MATERIALS MANUFACTURED AT THE FACILITIES LOCATED AT NATONIA HEIGHTS, BRACKENRIDGE, LATHROP, MIDLAND, AND LEECHBURG  
 FACILITIES OR A FACILITY AND IS NOT VALID FOR MATERIALS MANUFACTURED AT OTHER FACILITIES. EN 10204-3.1 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO ASME B31.1 AND THE PRESSURE EQUIPMENT  
 REGISTRY REG 9728-EC.  
 ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION (INFRARED, N, O, H BY INERT FUSION THERMAL CONDUCTIVITY, MM, P, SI, CR, NI, MO, CU, CR, CO, V, BY WDXRF, B  
 Y, CES, AL, AND Ti (P=0.10%) BY WDXRF; OTHERWISE BY OES, PB, BI, AG BY GFA.  
 CERTIFICATE OF TEST STATEMENT & CHEMISTRY STATEMENT  
 THIS MATERIAL HAS BEEN MANUFACTURED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND  
 RESULTS CONFORM TO THE SPECIFICATION AND ORDER REQUIREMENTS.  
 EXCEPT AS OTHERWISE NOTED, THIS MATERIAL HAS BEEN MANUFACTURED AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE LISTED SPECIFICATIONS AND  
 RESULTS CONFORM TO THE SPECIFICATION AND ORDER REQUIREMENTS.



500 Green Street  
Washington, PA 15801

MECS INC  
SYSTEMS INC/CDRP POINT  
P O BOX 14847  
SAINT LOUIS MO 63178

CERTIFIED MATERIAL  
TEST REPORT

OUR ORDER NO.  
YOUR ORDER NO.  
MEMO NO.  
DATE  
SALESMAN NO.

000-377-2238  
000-377-2238  
000-377-2238  
000-377-2238

2018

*Joe M. Xenakis*  
D.M. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

AL 802  
AETH 6230 07 ASPE S8240 A05 HRAF  
ZERR 817-209 REV 3 DTD 12/15/05  
ASTM A880-04

Heat	Slip	Lot No	Size	Pos	Weight
514218105	11024 A	208385	72.0000 x 240.0000	1	1217.5 MM
514218105	11011 ABA	208383	72.0000 x 240.0000	1	1217.5 MM
514218105	11011 ABB	208374	72.0000 x 240.0000	1	1217.5 MM
514218105	11011 ABC	208372	72.0000 x 240.0000	1	1217.5 MM
514218105	11072 AAC	208392	72.0000 x 240.0000	1	1217.5 MM
514218105	11074 AAD	208170	72.0000 x 240.0000	1	1580.8 MM
514218105	11074 AAE	208170	72.0000 x 240.0000	1	1580.8 MM
514218105	11095 AAF	208161	72.0000 x 240.0000	1	1580.8 MM
514218105	11095 AAG	208160	72.0000 x 240.0000	1	1580.8 MM
514218105	11098 AAH	208176	72.0000 x 240.0000	1	1580.8 MM
514218105	11098 AAI	208138	72.0000 x 240.0000	1	1580.8 MM
514218105	11099 AAJ	208514	72.0000 x 240.0000	1	1580.8 MM

Heat	C	Phi	P	SI	MI	DR	MO	CU	N	AL
514218105	.012	.586	.021	.0002	5.89	16.38	13.98	1.01	1.00	.005
514218105	.010	.540	.021	.0004	5.78	16.15	13.47	1.00	.981	.006
514218105	.005	.536	.022	.0005	5.75	16.01	13.41	1.05	.977	.0055
514218105	.005	.57	.021	.0001	5.80	16.11	13.45	1.05	.98	.008
514218105	.012	.63	.020	.0001	5.86	16.24	13.49	.98	1.01	.008
514218105	.011	.63	.020	.0004	5.84	16.22	13.48	.98	1.00	.008
514218105	.017	.55	.021	.0001	5.73	16.12	13.49	1.00	.95	.007

Set No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Exam	Corrosion
208385	.2362	TRANS	ANWEAL	33.5 KSI	108.0 KSI	60.0	55.0	BH4192		9

5 CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDS OF THESE TESTS, INCLUDING STATEMENTS ON ENTRIES ON THE CERTIFICATE, MAY BE OBTAINED AS SOON AS PRACTICABLE. LAW TESTING WAS PERFORMED AT ALC INDIANAPOLIS AND ISOTEC 17005 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT MARIETTA HEIGHTS, BRIDGEVILLE, LAYTONS, MIDLAND AND LEICESTER, PA. FACILITIES OR A INDICATED BY THE TEST NUMBER. LABORATORY EN 10204 - 3.1 ALLEGHENY LUDLIUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO AN MERRILLAT W01700 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 97/23/EC.

5 CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDS OF THESE TESTS, INCLUDING STATEMENTS ON ENTRIES ON THE CERTIFICATE, MAY BE OBTAINED AS SOON AS PRACTICABLE. LAW TESTING WAS PERFORMED AT ALC INDIANAPOLIS AND ISOTEC 17005 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT MARIETTA HEIGHTS, BRIDGEVILLE, LAYTONS, MIDLAND AND LEICESTER, PA. FACILITIES OR A INDICATED BY THE TEST NUMBER. LABORATORY EN 10204 - 3.1 ALLEGHENY LUDLIUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO AN MERRILLAT W01700 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 97/23/EC.

5 CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDS OF THESE TESTS, INCLUDING STATEMENTS ON ENTRIES ON THE CERTIFICATE, MAY BE OBTAINED AS SOON AS PRACTICABLE. LAW TESTING WAS PERFORMED AT ALC INDIANAPOLIS AND ISOTEC 17005 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT MARIETTA HEIGHTS, BRIDGEVILLE, LAYTONS, MIDLAND AND LEICESTER, PA. FACILITIES OR A INDICATED BY THE TEST NUMBER. LABORATORY EN 10204 - 3.1 ALLEGHENY LUDLIUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO AN MERRILLAT W01700 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 97/23/EC.



Allegheny Technology Company  
 SAID THE ROBERTS COMPANY  
 TO 403 FORLINE RD  
 WINTERTONVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

NECS INC  
 SYSTEMS INC/ICORP POINT  
 P O BOX 14547 ACT PAY  
 SAINT LOUIS MO 63178

OUR ORDER NO.  
 YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

*Joe M. Xenakis*  
 D. B. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

Lot No	Gauge	Coac	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion	S
208183	.2342	TRANS	ANNEAL	47.6 KSI	106.0 KSI	64.0	40.0	BHN191			5
208174	.2342	TRANS	ANNEAL	50.0 KSI	104.0 KSI	68.0	63.0	BHN187			4
208172	.2342	TRANS	ANNEAL	48.8 KSI	102.0 KSI	66.0	59.0	BHN185			4
208172	.2342	TRANS	ANNEAL	52.0 KSI	107.0 KSI	62.0	61.0	BHN195			5
208170	.3125	TRANS	ANNEAL	50.5 KSI	106.0 KSI	66.0	64.0	BHN190			5
208161	.3125	TRANS	ANNEAL	47.2 KSI	105.0 KSI	65.0	62.0	BHN194			4
208160	.3125	TRANS	ANNEAL	44.8 KSI	101.0 KSI	68.0	65.0	BHN189			5
208176	.3125	TRANS	ANNEAL	46.8 KSI	105.0 KSI	64.0	61.0	BHN187			6
208138	.3125	TRANS	ANNEAL	46.5 KSI	101.0 KSI	70.0	68.0	BHN179			4
208144	.3125	TRANS	ANNEAL	45.2 KSI	101.0 KSI	70.0	68.0	BHN179			5

ITEM # 10204-2005 3.1 CERTIFICATE  
 MATERIAL IS OF USA MELT AND MANUFACTURE  
 MATERIAL WAS PRODUCED WITHOUT KNOWN CONTACT WITH MERCURY  
 MATERIAL WAS NOT WELD REPAIRED

PAGE 2 FINAL PAGE

THIS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS FOLLOWS UNDER FEDERAL LAW: TESTING WAS PERFORMED AT ALCOA AND ISO 9001 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT ALCOA, ALBANY, MO, AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE FED 8128 EC. DIRECTIVE 8128 EC APPROVED LABORATORY EN 10204-3.1 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO APPROVED AT PRO NO. 786 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE FED 8128 EC. ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION/FURNACE; N, O, H BY INERT FUSION/THERMAL CONDUCTIVITY; Mn, P, Si, Cr, Ni, Mo, Cu, Co, V, BY WDXRB BY OES; AL AND Ti (C-D, ICP) BY WDXRB, OTHERWISE BY OES; Pb, Bi, Ag BY GFAA.



Allegheny Ludlum  
 Ship THE ROBERTS COMPANY  
 TO 133 FORLINES RD  
 MINTERVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15801

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

MELCS INC  
 SYSTEMS INC/CRIP POINT  
 P O BOX 14547  
 SAINT LOUIS MO 63178

OUR ORDER NO. EP-02-135576  
 YOUR ORDER NO. 119-61561  
 MEMO NO. 331877-00  
 DATE 04/08/2008  
 SALESMAN NO. 508

*Joe M. Xenakis*  
 D. W. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

AL BOX HRAP  
 ASTM A240 07 ASME SA240 A05  
 ZECOR 417-209 REV 3 DTD 12/15/06  
 ASTM A80-04 UME 538815

Heat	Slip	Lot No	Size	Pcs	Weight
514364101	12024 ABA	208596	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364101	12024 ABA	208596	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364103	12010 ABA	208592	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364103	12010 ABB	208598	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364103	12010 ABE	208598	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364104	12011 ABA	208604	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364104	12011 ABB	208604	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364105	12014 ABA	208583	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364105	12014 ABB	208601	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514364105	12014 ABE	208601	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514363104	12023 ABA	208880	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514363108	12078 ABA	208903	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514363105	12078 AAC	208903	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366101	12031 ABA	208890	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514366101	12031 ABB	208887	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514366102	12080 AAC	208902	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366103	12032 ABA	208881	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514366103	12032 ABB	208881	.2362 x 72.0000 x 240.0000	1	1217 6 MM
514366105	12079 ABA	208900	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366105	12079 ABB	208900	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366105	12079 AAC	208892	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366105	12079 ABE	208866	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366101	12081 ABA	208591	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366101	12081 ABB	208591	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366101	12081 ABE	208591	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM
514366101	12081 ABA	208591	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 8 MM

THIS CERTIFICATE OF TEST IS VALID NOT BE REPRODUCED OR COPIED WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS ON THIS CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS PER FEDERAL LAW. TESTING WAS PERFORMED AT ALC INDCAP AND ISO9001 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT NORTON HEIGHTS, BRACKENRIDGE, LAYPHE, MIDLAND, AND LEICESTER, IN FACILITIES OF A INDCAP AND ISO9001 APPROVED LABORATORY, EN 10204 - 3.1 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO ASTM A240 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 97/23/EC.  
 ALLEGHENY LUDLUM HAS PERFORMED CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNOLOGIES: C, S BY COMBUSTION; MP, P, S, NI, MO, CU, CR, CO, V BY WDS; B BY OES; AL AND TI (-0.10%) BY ICP; OTHERS BY OES, PL, BI, AG BY OES.





Allegheny Technologies  
 SHIP THE ROBERTS COMPANY  
 TO 133 FORLINES RD  
 WINTERVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

OUR ORDER NO.  
 YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

MECS IRC  
 SYSTEMS INC./CORP POINT  
 P O BOX 14547 ACT FAY  
 SAINT LOUIS MO 63178

2B590

*Joe M. Xenakis*  
 D.M. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

Heat	Slip	Lot No	Size	Pcs	Weight
514382102	12082 AAA	20882B	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM
514382102	12082 AAB	20882B	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM
514382102	12082 AAC	20882B	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM
514382103	12083 ABA	20887B	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM
514382103	12083 AAB	20887B	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM
514382104	12084 ABA	208867	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM
514382104	12084 AAB	208644	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM
514382104	12084 AAC	208644	.3150 x 72.0000 x 240.0000	1	1592 B MM

Heat	C	MN	S	SI	WI	CR	MO	CU	N	AL
514384101	.010	.55	.020	.0003	5.78	16.22	13.48	1.01	.96	.006
514384103	.004	.57	.021	.0003	5.83	16.13	13.45	1.06	.98	.0063
514384104	.008	.57	.021	.0001	5.80	16.11	13.45	1.05	.99	.006
514384105	.007	.56	.022	.0003	5.79	16.03	13.42	1.04	.97	.0058
514385104	.012	.63	.020	.0001	5.86	16.24	13.49	.98	1.01	.008
514385105	.011	.63	.020	.0001	5.85	16.23	13.49	.98	1.01	.007
514386101	.011	.63	.020	.0001	5.84	16.22	13.48	.98	1.00	.008
514386102	.017	.55	.021	.0001	5.82	16.25	13.50	1.01	.96	.0069
514386103	.018	.59	.020	.0002	5.72	16.10	13.46	1.00	.95	.007
514387101	.013	.64	.025	.0001	5.74	16.26	13.51	1.01	1.03	.010
514387102	.011	.64	.026	.0001	5.76	16.28	13.50	1.01	1.03	.011
514387103	.010	.64	.026	.0001	5.73	16.32	13.51	1.01	1.03	.010
514387104	.010	.65	.025	.0001	5.77	16.31	13.51	1.01	1.03	.011

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion

PAGE 2 CONTINUE ON PAGE 3

THE CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS PERMITTED UNDER FEDERAL LAW. TESTING WAS PERFORMED AT ALC NADCAP AND IROSEC 17025 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT WATSONA HEIGHTS, BRIDGEVILLE, LATROBE, MIDLAND, AND LEICHBURG, PA FACILITIES OR A NADCAP AND ALCSEC 17025 APPROVED LABORATORY. EN 10204 - B1 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO AD-MERBLATT W0109 100 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 97/23/EC. ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION; P, Mn, Si, Cr, Ni, Mo, Cu, Cd, Pb, Bi BY WDS; Fe BY OES, Al AND Ti (p-p, 10%) BY WDS; OTHERS BY OES. EN, BI, AG BY OES.



SHIP THE FOLLOWING COMPANY TO  
 133 FORLINES RD  
 MINERVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

MECS INC  
 SYSTEMS INC/CORP POINT  
 P O BOX 14547 ACT PAY  
 SAINT LOUIS MO 63178

OUR ORDER NO. 333897-00  
 YOUR ORDER NO. 333897-00  
 MEMO NO. 04/OB/2008  
 DATE 508  
 SALESMAN NO.

*Frederic M. Xenakis*  
 D. M. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion	θ
208596	.2362	TRANS	ANNEAL	47.7 KSI	103.0 KSI	68.0	66.0	BHN188			5
208582	.2362	TRANS	ANNEAL	47.5 KSI	104.0 KSI	65.0	62.0	BHN187			7
208598	.2362	TRANS	ANNEAL	47.7 KSI	103.0 KSI	65.0	61.0	BHN187			6
208604	.2362	TRANS	ANNEAL	50.0 KSI	106.0 KSI	54.0	61.0	BHN178			7
208683	.2362	TRANS	ANNEAL	47.5 KSI	106.0 KSI	62.0	60.0	BHN174			7
208601	.2362	TRANS	ANNEAL	49.2 KSI	107.0 KSI	60.0	58.0	BHN193			7
208680	.2362	TRANS	ANNEAL	48.4 KSI	105.0 KSI	66.0	62.0	BHN185			5
208903	.3150	TRANS	ANNEAL	52.0 KSI	108.0 KSI	59.0	56.0	BHN207			7
208990	.2362	TRANS	ANNEAL	51.5 KSI	108.0 KSI	62.0	60.0	BHN176			5
208887	.2362	TRANS	ANNEAL	50.5 KSI	107.0 KSI	60.0	58.0	BHN176			5
208902	.3150	TRANS	ANNEAL	51.5 KSI	109.0 KSI	63.0	57.0	BHN177			7
208881	.2362	TRANS	ANNEAL	50.0 KSI	105.0 KSI	65.0	62.0	BHN184			5
208900	.3150	TRANS	ANNEAL	47.6 KSI	102.0 KSI	70.0	64.0	BHN177			4

PAGE 3 CONTINUE IN PAGE 4

THIS REPORT OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY THE RECORDS OF THESE TESTS OR EQUIVALENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY BE FURNISHED AS  
 SUPPLEMENTARY INFORMATION TO THE REPORTS OF TESTS. THE COMPANY'S LABORATORY IS LOCATED AT NATRONA HEIGHTS, BRACKENRIDGE, LATROBE, MITCHELL AND LEICESTERS, PA FACILITIES ON A NONCAP AND  
 REC. TAGS ACCREDITED LABORATORY IN 1984-81 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO ASTM SPECIFICATION FOR THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 972392.  
 ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION (METHENOL, O. BY MET THERMAL CONDUCTIVITY MIN. P, SI, CR, NI, MO, CU, CR, CO, V, BY WDDPP. PBY OES. AL AND TI (P-0.10%)  
 Y WDDPP. OTHERWISE BY OES. PA, BI, AG BY GFAA



Allegheny Technology Company  
 SHIP THE TRIPLES COMPANY  
 TO 133 FORLINES RD  
 WINTERTVILLE, NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

MCCS INC  
 SYSTEMS INC./CORP POINT  
 P. O. BOX 14547 ACT PAY  
 SAINT LOUIS MO 63178

OUR ORDER NO. 119-24251  
 YOUR ORDER NO. 331877-00  
 MEMO NO. 04/08/2008  
 DATE 508  
 SALESMAN NO.

*Pat M. Xenakis*  
 D. M. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

28590

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion	θ
208596	.2362	TRANS	ANNEAL	47.7 KSI	103.0 KSI	68.0	66.0	BHN188			5
208582	.2362	TRANS	ANNEAL	47.5 KSI	104.0 KSI	65.0	62.0	BHN187			7
208558	.2362	TRANS	ANNEAL	47.7 KSI	103.0 KSI	65.0	61.0	BHN187			6
208604	.2362	TRANS	ANNEAL	50.0 KSI	106.0 KSI	56.0	61.0	BHN198			7
208583	.2362	TRANS	ANNEAL	47.5 KSI	106.0 KSI	62.0	60.0	BHN194			7
208601	.2362	TRANS	ANNEAL	49.2 KSI	107.0 KSI	60.0	58.0	BHN193			7
208680	.2362	TRANS	ANNEAL	48.4 KSI	105.0 KSI	66.0	62.0	BHN185			5
208703	.3150	TRANS	ANNEAL	52.0 KSI	108.0 KSI	59.0	56.0	BHN207			7
208690	.2362	TRANS	ANNEAL	51.5 KSI	108.0 KSI	62.0	60.0	BHN196			5
208697	.2362	TRANS	ANNEAL	50.5 KSI	107.0 KSI	60.0	58.0	BHN196			5
208902	.3150	TRANS	ANNEAL	51.5 KSI	109.0 KSI	63.0	57.0	BHN197			7
208801	.2362	TRANS	ANNEAL	50.0 KSI	105.0 KSI	65.0	62.0	BHN186			5
208700	.3150	TRANS	ANNEAL	47.6 KSI	102.0 KSI	70.0	64.0	BHN177			4

PAGE 3 CONTINUE ON PAGE 4

THIS CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY. THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ERRORS ON THE CERTIFICATE MAY BE PUNISHED AS PERMITTED UNDER FEDERAL LAW. TESTING WAS PERFORMED AT ALC IMPCAP AND ISO/IEC 17025 APPROVED LABORATORIES LOCATED AT NATTOMA HEIGHTS, BRACKENRIDGE, LATROBE, AND LEBANON, PA. FACILITIES OR A BRACKENRIDGE AND BRACKENRIDGE LABORATORY EN 17024-31. ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO AN MEMORANDUM 100 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 97/23/EC. ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION/FERRELL, O, H BY WETT FUSION/THERMAL CONDUCTIVITY, N, P, S, CR, NI, MO, CU, CO, V, BY WIDOMER. BY CES, AL AND TI (S-O, Ti) BY WIDOMER. BY CES, PL, B, AS BY GSA.



Allegheny Technologies  
 THE ROBERTS COMPANY  
 133 FORLINES RD  
 MINTERVILLE NC

500 Green Street  
 Washington, PA 15301

CERTIFIED MATERIAL  
 TEST REPORT

OUR ORDER NO.  
 YOUR ORDER NO.  
 MEMO NO.  
 DATE  
 SALESMAN NO.

MECS INC.  
 SYSTEMS INC./CORP POINT  
 P O BOX 14547 ACT PAY  
 SAINT LOUIS MO 63178

503  
*Joe M. Xenakis*  
 D.M. XENAKIS - Director, Corporate Quality Assurance

Lot No	Gauge	Cond	Test	Yield Strength	Tensile Strength	Elong	Red. of Area	Hardness	Bend	Corrosion	S
208892	.3150	TRANS	ANNEAL	51.0 KSI	108.0 KSI	62.0	58.0	BHN202			7
208866	.3150	TRANS	ANNEAL	47.4 KSI	102.0 KSI	70.0	67.0	BHN183			4
208591	.3150	TRANS	ANNEAL	45.5 KSI	102.0 KSI	69.0	66.0	BHN182			4
208828	.3150	TRANS	ANNEAL	45.7 KSI	101.0 KSI	70.0	64.0	BHN183			5
208978	.3150	TRANS	ANNEAL	52.0 KSI	107.0 KSI	60.0	62.0	BHN177			5
208867	.3150	TRANS	ANNEAL	45.5 KSI	102.0 KSI	70.0	67.0	BHN179			4
208644	.3150	TRANS	ANNEAL	52.0 KSI	108.0 KSI	55.0	60.0	BHN207			7

DIN EN 10204-2005 3.1 CERTIFICATE  
 MATERIAL IS OF USA MELT AND MANUFACTURE  
 MATERIAL WAS PRODUCED WITHOUT KNOWN CONTACT WITH MERCURY  
 MATERIAL WAS NOT WELD REPAIRED

IF CERTIFICATE OF TEST SHALL NOT BE REPRODUCED IN FULL WITHOUT THE WRITTEN APPROVAL OF THE COMPANY, THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE MAY BE FURNISHED AS  
 1) A CONTAMINATED FEDERAL AID TESTING WAS PERFORMED AT ALL HONOR AND ISSUED TO BE APPROVED LABORATORIES LOCATED AT WASHINGTON, DC, BOSTON, MA, CHICAGO, IL, DETROIT, MI, HOUSTON, TX, INDIANAPOLIS, IN, KANSAS CITY, MO, LOS ANGELES, CA, MEMPHIS, TN, MILWAUKEE, WI, NEW YORK, NY, PHOENIX, AZ, RICHMOND, VA, ST. LOUIS, MO, TAMPA, FL, WASHINGTON, DC, WILSON, NC  
 2) THE TESTER RECEIVED LABORATORY EN 10204-3.1 ALLEGHENY LUDLUM IS APPROVED AS MANUFACTURER ACCORDING TO ASME B31.1 AND THE PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE PED 2013/95/EC  
 ALLEGHENY LUDLUM PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES: C, S BY COMBUSTION (INFRARED), N, O, H BY NEBT FUSION THERMAL CONDUCTIVITY, MN, P, S, CR, NI, MO, CU, CO, V, BY WDXRF. BY OES, AL AND TI (-0.10%)  
 OTHERWISE BY OES, Pb, Bi, Ag BY OES



Internacional S. de R.L. de C.V.

Stainless Steel Wire Department  
Certification of Compliance

ACS Internacional S. de R.L. de C.V. (Planta 1)  
Ave. Ruiz Cortinez # 1855 Pte.  
Col. Estrella  
Monterrey Nuevo León México 64000  
Tel: 8351-2622  
Fax: 8331-1781  
Contact: Carlos Vargas  
E-Mail: [cvargas@acsind.com](mailto:cvargas@acsind.com)

Separations  
Technology  
14211 industry RD  
Houston TX 77056

Supplier	Part Number	ZECOR045S-M-MIG	ZECOR045S-M-MIG
Rev.			Date: 18 DE JUNIO 2006
P.O.	4500139209		Qty. Shipped: 545.88 LBS

CHEMICAL

ELEMENTS		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SPECIFICATION	Minimum									
	N/S									
	Maximum									
Vendor Results %		0.013	5.77	0.48	0.012	0.0003	13.53	15.33	1.01	0.98

DIMENSIONAL & MECHANICAL RESULTS

Property	Requirement	Method	1	2	3	4	5	6
Diameter	+ .000 - .002	Micrometer	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
Tensile (KSI)	N/S	Instron	126.5	125.9	127.3	127	126.9	126.72
Elongation	N/S	Instron	58.1	57.36	56.57	57.9	58.2	57.626
General Comments:								

Quality Control  
ROGER SANCHEZ



Internacional S. de R.L. de C.V.

Stainless Steel Wire Department  
Certification of Compliance

SUPPLIER
ACS Internacional S. de R.L. de C.V. (Planta 1) Ave. Ruiz Cortinez # 1855 Pte. Col. Estrella Monterrey Nuevo León México 64000 Tel: 8351-2622 Fax: 8331-1781 Contact: Jose Vega E-Mail: <a href="mailto:jvega@acsind.com">jvega@acsind.com</a>

CUSTOMER
Separations Technology 14211 Industry RD Houston TX 77056

Customer Part Number:	ZEC093S-36.0-M-TIG	Certificate of Conformance No.	
Supplier Part Number	ZEC093S-36.0-M-TIG		ZEC093S-36.0-M-TIG
Rev.		Date:	30-Apr-08
P.O.	4500188127	Qty. Shipped:	1529 LBS

CHEMICAL

Type	ZECOR	Heat	D 12E									
ELEMENTS				C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SPECIFICATION	Minimum											
N/S	Maximum											
CERTIFICATE OF COMPLIANCE												
Vendor Results %		0.01	5.9	0.56	0.011	0.0003	N/S	15.35	0.56	0.99		
CERTIFICATE OF COMPLIANCE												
ACS Results %		0.02	0.63	0.014	0.009	4.55	14.03	15.86	0.91	1.22		

DIMENSIONAL & MECHANICAL RESULTS

Characteristics	Specification	Cal. Instr.											
Diameter	+ .000 - .002	Micrometer	0.0928	0.0928	0.0928	0.0928	0.0928	0.0928	0.09272				
Tensile (KSI)	N/S	Instron	128.8	123.9	124.5	125.7	123.6	124.94					
Elongation	N/S	Instron	35.04	45.24	44.85	39.54	39.97	40.886					
General Comments:													

Certification Approves  
Quality Control  
VICTOR JUAREZ

# Referencias

---

- American Welding Society, (2004). “*Manual de soldadura*”, 4ta edición, editorial: Pearson.
- Arata Adolfo, (2006) “Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales”. *Industry*, editorial: Machine, **23**, 32-37.
- Avilés Rafael (2005). “*Análisis de fatiga en máquinas*”. 1era edición, editorial: Thomson, España. Disponible en:  
[www.agapea.com/ANaLISIS-DE-FATIGA-ENMaQUINAS-n216306i.htm](http://www.agapea.com/ANaLISIS-DE-FATIGA-ENMaQUINAS-n216306i.htm).
- Bascuñán G. (1998) “*Ingeniería de construcción*” Universidad Católica de Chile.  
Disponible en:  
[http://ingeneril.co.ve/books?id=bw4NAQAIAAJ&pg=PA63&dq=medicion+de+espesores&hl=es&ei=LwZJTMCS4K88gbw2ojDDg&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=9&ved=0CFEQ6AEwCA#v=onepage&qf=false](http://ingeneril.co.ve/books?id=bw4NAQAIAAJ&pg=PA63&dq=medicion+de+espesores&hl=es&ei=LwZJTMCS4K88gbw2ojDDg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=9&ved=0CFEQ6AEwCA#v=onepage&qf=false).

- Borrás V. (2003) “*Tecnología de materiales*” Universidad Politécnica de Valencia.

Disponible en:

[https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4792/1/Memoria%20Gr%C3%A9gorio%20Szyndelmanparticulas+magneticas&hl=es&ei=ugJJTN6B4P48AbjzZSPDw&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=5&ved=0CDsQ6AEwBA#v=onepage&q&f=false](https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4792/1/Memoria%20Gr%C3%A9gorio%20Szyndelmanparticulas+magneticas&hl=es&ei=ugJJTN6B4P48AbjzZSPDw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=5&ved=0CDsQ6AEwBA#v=onepage&q&f=false).

- Cabeza María Alejandra, Cabrita Edgar, (2006). “El análisis de riesgo cuantitativo como una poderosa herramienta para la planificación estratégica de procesos petroquímicos”. Trabajo de grado, Universidad Simón Bolívar.
- DeGarmo E, Black J, Kohser R, (2007). “*Materiales y procesos de fabricación*”, 10ma edición, editorial: Reverte, S.A., España.
- Falk Jim, (1986). “*Metalotecnica Fundamental*”, 1era edición, editorial: Reverte, S.A., España.
- Fraire Leticia, (2009). “*La industria petroquímica Mexicana*”, Tecnológico de Monterrey, México.
- García M, Fernández M, Orcajo A, Rodríguez J, Sariego J. (1998) “*Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas*”. 1era edición, editorial: Reverte, S.A., España.

Disponible en:

[http://www.scielo.org.ve/#hl=es&tbs=bks%3A1&q=termografia+en+la+industria&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs\\_rfai=&fp=f28071fb1bebe442](http://www.scielo.org.ve/#hl=es&tbs=bks%3A1&q=termografia+en+la+industria&aq=f&aqi=&aql=&oq=&gs_rfai=&fp=f28071fb1bebe442).

- Gómez Eduardo, (2006). “*Ensayos no destructivos, ultrasonido nivel II*”. 2da edición, editorial: FC, México.
- Grajales Sergio, (2000). “*Metodología de la Investigación*”, 1era edición, editorial: SICCO, México.
- Herrera Víctor, Sendoya Félix, (2007). “Tendencias actuales para determinar la degradación de los materiales metálicos de componentes estructurales”. *CEADEN*, **42**, 17-28.
- Hideki Katayama, Kazuhiko Noda, Hiroyuki Masuda, Makoto Nagasawa, Masayuki Itagaki, Kunihiro Watanabe, (2005). “Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment”. *Corrosion Science*, **47**, 2599–2606.
- Inspecciones Chile (2010). [página web en línea].  
Disponibile en: [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com).  
Disponibile en: [www.inspeccioneschile.com](http://www.inspeccioneschile.com).
- Karpakjian S., Schmid S., (2008). “Manufactura, ingeniería y tecnología”, cuarta edición, Pearson Educación, México.
- Manual descripción de procesos Pequiven (2007).
- Nothomb Amélie, (2007). “*Ácido sulfúrico*”. 3era edición, editorial: LGF, España.

- Ortega José Antonio, (1990). “*Corrosión industrial*”. 1era edición, editorial: Marcombo, Mexico.
- Rosaler Robert, (1997). “*Manual de mantenimiento industrial*”, 5ta edición, editorial: McCraw- Hill., España.
- Rubertis Esteban, Martin Toscano, (2007) “Evaluación de integridad estructural, análisis de riesgo (RBI) y desarrollo de plan de integridad en planta de tratamiento de gas”. *CONICET*, **11**, 8-15.
- Santa Cruz Wilbert Gibran, Pacho-Carrillo Juan Daniel, (2006). “Optimización de una torre de absorción en una planta endulzamiento de gas natural”. *IMIQ*, **21**, 34-43.
- Sward, Knut (2002). “*Máquinas; Máquinas herramientas mantenimiento (ingeniería)*”, segunda edición, editorial: Blume. United states.
- Uzcategui, (2008). “Corrosión” Universidad de Carabobo.
- Vian Ángel, (1999). “*Introducción a la química industrial*”, 1era edición, editorial: Reverte S.A., España.
- Xiao Kui, Dong Chao-fang, Li Xiao-gang, Wang Fu-ming, (2008). “Corrosion Products and Formation Mechanism During Initial Stage of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel”. *Journal of iron and steel research, international*, **15**, 42-48.