



Republica de Cuba
Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Maestría de Electromecánica

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN CIENCIAS TÉCNICAS

Título: Fallas de estructuras metálicas instaladas en la planta de lixiviación de la Empresa Ernesto Che Guevara sometidas a atmósfera corrosiva

Autor: Ing. José Antonio Sablón Leyva

Tutores: Dr.C. Félix Morales Rodríguez
MSc. Isnel Rodríguez González

Moa 2008

Agradecimientos:

Agradezco especialmente a todas aquellas personas que me apoyaron para la realización de esta tesis:

- ✚ Al estudiante Rodney Enrique Correa Suárez por su dedicación, sacrificio y buen resultado obtenido en la tesis de Ingeniería.
- ✚ A los Profesores (Isnel Rodriguez Gonzáles, Alberto Velázquez del Rosario, Manuel Garcia Rente, Felix Morales, entre otros.), por su incondicionalidad, exigencia, colaboración, apoyo, paciencia y sobre todo ser fieles consejeros en el desarrollo de este trabajo.
- ✚ A mis dos hijas; Aymeé y Dayneé por ser lo más lindo de mi vida.
- ✚ A mi familia, a todas mis amistades, a todos los que desinteresadamente me mostraron el camino del éxito.
- ✚ A mi esposa Yolayda, por su apoyo en todo momento, su amor y dedicación incondicional.
- ✚ A todos los trabajadores de la Empresa Cmdte. “Ernesto Che Guevara” que me brindaron su ayuda, a todos muchas gracias.

Resumen:

En el presente trabajo se hace un análisis de la resistencia mecánica de estructuras metálicas expuestas a atmósfera altamente corrosiva, perteneciente a la primera etapa del proceso de lixiviación de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa. Se realiza la modelación FEM determinándose en estas el comportamiento de las tensiones y deformaciones surgidas a lo largo de sus secciones transversales. Se realiza un estudio de las variables atmosféricas presentes en la planta que afectan las estructuras de la planta, se definen la influencia y los factores causantes del deterioro de los metales. Se propone una estrategia para el incremento de la resistencia a la corrosión con el empleo de recubrimientos de pintura.

Summary:

This work is based on the analysis of the mechanical resistance of exposed metallic structures to highly corrosive atmosphere at the first stage of the leaching process in the Nickel Company "Ernesto Che Guevara". The characterization and evaluation the solicitations that are subjected the structures that support effort are exposed. There are defined the different types of corrosion attacking the structures, as well as the factors and its influences on the metals. It is also realized the Finite Element Modelling of the structures more affected by the degradation of metals phenomenon, being determined the tensions and deformations behaviour. It is also propose the strategy for increasing the corrosion resistance using painting coating.

<u>INDICE</u>	<u>Pag.</u>
Introducción	1
1 CAPITULO I. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO	4
1.1 - Introducción	4
1.2 - Características de los aceros de construcción.	4
1.3- Resistencia mecánica en estructuras metálicas	5
1.3.1 - Análisis de estabilidad en estructuras metálicas	5
1.4 - Modelación por el método de elementos finitos	6
1.4.1 - Simulación numérica	6
1.4.2 - Situaciones de no linealidad presentes en problemas reales	7
1.4.2.1 - Análisis no lineal por la geometría.	8
1.5 – Proceso de Corrosión Atmosférica	9
1.5.1 - Factores que favorecen los procesos de corrosión atmosférica	9
1.5.2 - Influencia de las condiciones meteorológicas en la corrosión	10
1.5.2.1 - Contaminación Atmosférica	10
1.5.3 - Principales contaminantes que inciden en la velocidad de corrosión	11
1.5.4 - Calibración de la Atmósfera	12
1.5.5 - Los contaminantes atmosféricos	14
1.5.6 – Método de control de la corrosión atmosférica	14
1.5.7- Contaminantes en la atmósfera de la Empresa Ernesto Che Guevara.	15
1.6 – Protección de estructuras dañadas por la corrosión atmosférica	16
1.6.1 - La protección de estructuras metálicas con pinturas	17
1.6.1.1 - La pintura y su composición básica	18
1.6.1.2 - Tipos de Pinturas	18
1.6.1.3 - Standard de preparación de superficies	19
1.6.1.4 Aplicación de recubrimientos anticorrosivos	19
1.6.1.5 - Método de aplicación de recubrimientos anticorrosivos	20

1.8 - Conclusiones del capítulo	20
2. - CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS	21
2.1 – Introducción	21
2.2. Determinación de la resistencia mecánica de estructuras metálicas	21
2.2.1. Determinación de la resistencia a la estabilidad por compresión	22
2.2.1.1 - Cálculo de la carga crítica	23
2.2.1.2 – Determinación de la tensión crítica	23
2.2.1.3 – Obtención de la condición de estabilidad	24
2.2.2 - Solicitación de Flexión	25
2.3 – Aplicación del M.E.F en estructuras metálicas	26
2.3.1 – Formulación matemática de elementos finitos	26
2.3.2 - Pasos para el modelado por el MEF en las estructuras	28
2.3.2.1 - Condiciones de contorno estructurales	28
2.3.2.2 - Aplicación de solicitaciones y condiciones de contorno	28
2.3. Determinación de los espesores de los perfiles metálicos	30
2.4 - Caracterización de la atmósfera	30
2.4.1 - Mediciones de gases.	31
2.4.2 – Meteorología de la empresa	32
2.5 – Metodología para la protección anticorrosiva	32
2.5.1 - Preparación y limpieza de las superficies de acero	32
2.5.2 - Chorreado abrasivo	33
2.5.3 – Recubrimiento	34
2.5.4 Aplicación del sistema epoxy – poliuretano	34
2.6 – Conclusiones	34

3- CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	36
3.1 - Introducción.	36
3.2 - Determinación de los espesores de estructuras metálicas afectadas	36
3.2.1 - Espesores de las columnas afectadas	36
3.2.2 - Determinación de los espesores en las vigas	37
3.3 - Cálculo de la resistencia mecánica de vigas y columnas afectadas	38
3.3.1 - Cálculo de pandeo de las columnas	38
3.3.2 - Análisis de las vigas sometidas a flexión	39
3.4 - Análisis de los resultados de la simulación por Elementos Finitos.	40
3.4.1 - Resultados de la simulación por Elementos Finitos para las vigas.	42
3.5 Caracterización de la atmósfera de la planta	44
3.5.1 Mediciones de los polvos en suspensión	44
3.5.2 - Mediciones de gases.	45
3.5.3 - Resultados de las variables meteorológicas	48
3.5.3.1 - Comportamiento de la temperatura.	48
3.5.3.2 – Análisis de las precipitaciones	49
3.5.3.3 - Velocidades de los vientos	50
3.5.3.4 - Humedad relativa	50
3.6 - Procedimiento para la aplicación de protección anticorrosiva	52
3.7 - Valoración económica	53
3.7.1 - Costo de la reparación capital	53
3.7.2 - Costos del mantenimiento anticorrosivo	53
3.7.3 - Costos Total de Reparación	54
3.8 - Impacto social	54
Conclusiones del capítulo	54

Conclusiones Generales	55
Recomendaciones	56
Resumen	57
Bibliografía	58

INTRODUCCIÓN

El proceso tecnológico (carbonato amoniacal) de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa se caracteriza por constantes emanaciones de gases y polvo, lo que hace que la atmósfera industrial sea altamente corrosiva e influya negativamente en la vida útil de las estructuras metálicas instaladas, agudizándose mas en las plantas de lixiviación, recuperación de amoniaco, calcinación y sínter. Durante los años de explotación de la fábrica se han implementado múltiples modificaciones y ejecutado inversiones con el objetivo de atenuar este fenómeno, además de ser el principal objetivo del tema medioambiental. No obstante las reparaciones de estructuras metálicas y equipos instalados se hace cada vez más necesario para poder mantener la industria y seguir operando. La planta de lixiviación ha sido la de mayor afectación por corrosión, reflejado en averías de gran envergadura, ocurridas particularmente por fallas en las estructuras metálicas de la primera etapa del proceso de turboareación, lo que ha provocado considerables perdidas en la producción de níquel, elevado gasto de recursos financieros y afectación al medio ambiente, así mismo no existe un sistema adecuado de protección anticorrosiva que permita alargar la vida útil de las instalaciones.

Para que se tenga una idea, esta primera etapa es la más próxima a la planta de Hornos de reducción donde las emanaciones de gases y polvo son intensas, la misma está compuesta por estructuras que miden aproximadamente 100 m de largo, hasta 10 de alto y soportan 24 turboareadores, además de todas las tuberías del sistema en esa zona. Los turbos tienen la función de lixiviar el níquel y el cobalto de la pulpa mediante la aireación, es decir, son reactores donde se verifican las reacciones químicas de oxidación de las diferentes especies químicas que componen el mineral.

Situación Problemática

Las estructuras metálicas y equipos instalados en todas las áreas de la fábrica Ernesto Che Guevara, debido al alto nivel de emanaciones de polvo y gases son afectados por la corrosión electroquímica, disminuyendo el espesor de su sección transversal y por ende sus propiedades mecánicas, conduciendo a fallas que afectan el proceso productivo y

generan pérdidas y gastos elevados, además del aumento de los costos por concepto de reparaciones y mantenimientos.

En la empresa hasta el momento no se han realizado estudios y no existen referencias ni evidencias de trabajos precedentes enfocando el problema de la corrosión en instalaciones y equipos a partir de los efectos de la atmósfera y al mismo tiempo no se haya establecido un método adecuado de protección anticorrosiva.

Problema

Desconocimiento de las causas que provocan las fallas en las estructuras metálicas sometidas a atmósfera altamente corrosiva, instaladas en la primera etapa de turboareadores en planta de lixiviación de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa.

Hipótesis científica del trabajo:

Si se conocen las causas de las fallas y la influencia de la atmósfera corrosiva, entonces se podrá proponer acciones que permitan atenuar el fenómeno de la corrosión y evitar averías en estructuras metálicas instaladas en la planta de lixiviación de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa.

Objetivo General

Determinar las principales causas que provocan las fallas de las estructuras metálicas sometidas a atmósfera altamente corrosiva, de la primera etapa del proceso de turboareación en planta de lixiviación de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Objetivos específicos:

- Calcular los valores de resistencia mecánica de vigas y columnas en estructuras sometidas a atmósfera altamente corrosiva, de la primera etapa del proceso de turboareación en las condiciones actuales.
- Caracterizar la atmósfera a la que se encuentran expuestas las estructuras metálicas en la planta de lixiviación.
- Proponer un procedimiento de protección anticorrosivo para las estructuras, adecuado a las condiciones ambientales actuales

Tareas:

- Caracterización de las estructuras metálicas que componen una miniserie por perfiles y según las cargas a que están sometidas.
- Caracterización de la atmósfera corrosiva en la planta de lixiviación.
- Modelación por el método de elementos finitos de estructuras seleccionadas.
- Valoración de los resultados obtenidos.
- Proposición de procedimientos para la protección anticorrosiva en estructuras metálicas instaladas en la primera etapa de turboareadores en planta de lixiviación

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 – Introducción

Es de vital importancia elaborar el marco teórico de toda investigación, en el caso de las estructuras metálicas afectadas por la corrosión permite detectar de forma preliminar las diferentes características y deficiencias que existen en las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos que están presentes.

Objetivo del capítulo:

Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionada con el tema, así como la influencia que ejerce la atmósfera industrial altamente contaminada en el comportamiento de las propiedades mecánicas de estructuras metálicas.

1.2 - Características de los aceros de construcción.

Los aceros de construcción (Guliaev, 1986) son empleados para la confección de puentes, gasoductos, oleoductos, armaduras, calderas, etc. Por lo general todos los aceros para estructuras son soldables y la soldabilidad es una de sus principales propiedades. Su contenido de carbono es de (0,22-0,25%). El aumento de su resistencia se consigue aleándolo con elementos baratos, como el manganeso y el silicio, presentan un límite de fluencia de 370-480 MPa (38- 49 Kgf/mm²) y una resistencia a la rotura de 490-588 MPa (50- 60 Kgf/mm²).

Los aceros al carbono más empleados para estructuras son: CT1, CT2 y CT3, que se suministran de acuerdo con la normas GOST 380 -71. Son aceros de bajo contenido de carbono obtenidos por laminación en caliente y de ellos el más empleado es el acero CT3, equivalente a AE-235D en la norma UNE, al ST-37 en la norma DIN y al A-570 en la norma ASTM.

Según Guliaev (1986), para las estructuras no soldadas (o para las soldadas de poca responsabilidad) debe utilizarse el acero efervescente, y para las soldadas, el acero semicalmado y calmado.

De los aceros obtenidos por los tres procedimientos de desoxidación (calmado, semicalmado y efervescente) el más empleado es el calmado que tiene umbral de fragilidad en frío más bajo.

1.3 - Resistencia mecánica en estructuras metálicas

Las estructuras metálicas (Megson, 2000) empleadas como soportes de equipos y recipientes están sometidas a dos solicitaciones fundamentales a saber:

2 Pandeo

3 Flexión

La sollicitación de pandeo se produce fundamentalmente por las cargas tecnológicas que actúan sobre las estructuras (columnas), ésta generalmente está asociada con la estabilidad y con esfuerzos de compresión y que tienen una dirección longitudinal. En el caso de sollicitación por flexión es derivada de las cargas transversales sobre las estructuras (vigas), se asocia con cargas o esfuerzos de tracción

1.3.1 - Análisis de estabilidad en estructuras metálicas

Para analizar la estabilidad es necesario escoger la metodología de cálculo clásica (Fernández-Levy, 1987), la cual supone que el sistema es ideal o sea que si se trata de una barra comprimida axialmente su eje es absolutamente recto, el material es homogéneo y las fuerzas se aplican centralmente.

El fenómeno de la pérdida de estabilidad o pandeo consiste en el paso del equilibrio estable de la columna comprimida al de equilibrio indiferente o equilibrio inestable. El cálculo de este fenómeno presenta la característica de ser no lineal por el cambio de la geometría del elemento que sufre su efecto.

La pérdida de estabilidad es uno de los fenómenos que debe ser estudiado por el proyectista estructural con rigor y detenimiento, pues su aparición muchas veces adopta formas sutiles, razón por la cual se debe estar convenientemente preparado para su identificación y tratamiento pues la historia ha demostrado que muchos de los fallos estructurales se han debido a la pérdida de dicha estabilidad general de la estructura o de alguno de sus elementos.

1.4 - Modelación por el método de elementos finitos

La simulación de procesos es una de las mas grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho mas simple y entendible. Esta simulación es en algunos casos casi indispensable, como nos daremos cuenta a continuación. En otros casos no lo es tanto, pero sin este procedimiento se hace mas complicado.

La simulación (Hutton, 2004) representa un proceso o fenómeno mediante otro más simple que permite analizar sus características.

1.4.1 - Simulación numérica

Las empresas de países desarrollados han obligado en los últimos años a implantar en las empresas todas aquellas tecnologías que puedan hacer realidad los tres grandes objetivos del diseño moderno:

- Diseñar para conseguir para una fabricación a un costo competitivo.
- Diseñar en orden la utilización real en servicio.
- Diseñar bien al primer intento.

Mediante la simulación numérica es posible generar sólidos de aspecto casi real, comprobar su comportamiento bajo diversas condiciones de trabajo, estudiar el movimiento conjunto de grupos de sólidos, etc. Esto permite un conocimiento mucho mas profundo de un producto antes de que exista físicamente, siendo posible detectar muchos de los problemas que de otro modo se hubieran detectado en el servicio real.

El método de los elementos finitos (Hutton, 2004) es una de las más importantes técnicas de simulación y seguramente la más utilizada en las aplicaciones industriales. Aunque su utilización es extensible a multitud de problemas de física.

El método de elementos finitos (M.E.F.) puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste la reducción del problema con infinitos grados de libertad en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (nodos). Las

incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas del problema cuando pasan a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. En realidad no se trata de nada nuevo. El cálculo de estructuras se efectúa también restringiendo el análisis corrimientos de los nudos de unión.

Como puede apreciarse en el M.E.F son casi esenciales los conceptos de discretización o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y de "interpolación" o aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos, es un método aproximado desde múltiples perspectivas:

- a) Discretización.
- b) Interpolación.
- c) Utilización de métodos numéricos.

La presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución de un problema dado de ingeniería. Los diversos coeficientes del modelo son automáticamente calculados con el empleo de softwares a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decidir hasta qué punto las condiciones de frontera y la discretización utilizada representa adecuadamente el modelo.

La discretización correcta depende de diversos factores como son el tipo de información que se desea extraer del modelo o el tipo de solicitud aplicada.

Este método se ha ido generalizando en la actualidad hasta constituir una potente herramienta de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física formulable como un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo, entre otros.

1.4.2 - Situaciones de no linealidad presentes en problemas reales

La no linealidad por la geometría ocurre cuando las deformaciones originadas por las cargas son tales que causan cambios importantes en la geometría del elemento.

La no linealidad por la geometría estará causada por la esbeltez de la columna la cual soportara mejor la acción de la carga longitudinal mientras menor sea la referida esbeltez.

La flexión en el pandeo se verifica en el sentido de la menor inercia de la sección transversal de la columna.

Las estructuras (ver figura 1.2) experimentan un comportamiento no lineal por la geometría.

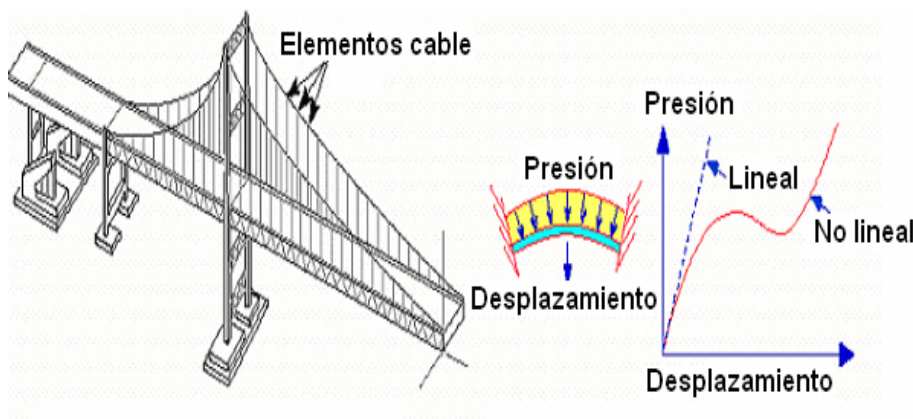


Figura 1.2. Ejemplo de no linealidad por la geometría en puentes

1.4.2.1 - Análisis no lineal por la geometría.

En el análisis no lineal por elementos finitos, una importante fuente de no linealidades, se debe al efecto de los grandes desplazamientos en la configuración geométrica global de la estructura. En análisis lineal los desplazamientos inducidos son muy pequeños de tal forma que se ignoran los cambios de rigidez de la estructura causados por las cargas. En cambio, las estructuras y componentes mecánicos con grandes desplazamientos pueden experimentar importantes cambios en la geometría debido a que las cargas inducidas por la deformación pueden provocar una respuesta no lineal de la estructura en forma de rigidización o ablandamiento. Las estructuras tipo cable (fig. 1.2) en general muestran un comportamiento de rigidización al aumentar la carga, en cambio, las estructuras en arco primero sufren un ablandamiento seguido de una rigidización por tensión, un comportamiento ampliamente conocido como pandeo.

1.5– Proceso de Corrosión Atmosférica

La corrosión atmosférica (Ailor,1986) es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones. El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica. El electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (invisibles) hasta capas que mojan perceptiblemente el metal. La duración del proceso de corrosión depende sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica. Su característica principal es la presencia de un proceso anódico y otro catódico, con un electrolito de resistencia óhmica determinada.

En el proceso anódico el metal se disuelve en la capa del electrolito, en la cual la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble.

En el proceso catódico, bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción de oxígeno.

La resistencia óhmica entre las zonas anódica y catódica de las minúsculas pilas de corrosión que se distribuyen sobre el metal es grande cuando el espesor de la capa de humedad es pequeño.

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

- a) Corrosión seca: se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa.
- b) Corrosión húmeda: requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.
- c) Corrosión por mojado: se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

1.5.1 - Factores que favorecen los procesos de corrosión atmosférica

La acción conjunta de los factores de contaminación y los agentes meteorológicos (Arroyave, 1995) determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos y cuando actúan simultáneamente, aumentan sus efectos. También es importante

mentar otros elementos como las condiciones de exposición, la composición del metal y las propiedades del óxido formado, que combinados entre sí influyen en los procesos de corrosión.

1.5.2 - Influencia de las condiciones meteorológicas en la corrosión

La característica atmosférica más importante(Avila, 2005), relacionada directamente con el proceso de corrosión es la humedad, esta es el origen del electrolito necesario en el proceso electroquímico.

Es de importancia el conocimiento de las causas y los factores que influyen en la formación de películas de humedad sobre la superficie metálica. El factor fundamental es la precipitación atmosférica (lluvia o niebla espesa).

Existe también la condensación de humedad, la que se origina cuando la humedad relativa de la atmósfera sobrepasa el 100%. Es importante mencionar también la condensación por adsorción, la condensación capilar y la condensación química.

Cuando se alcanza el nivel de humedad necesario para la formación de pilas de corrosión comienza a ser importante un segundo factor: de contaminación atmosférica.

1.5.2.1 - Contaminación Atmosférica

Se puede definir la contaminación atmosférica (Biswas, 1987) como "la presencia en el aire de sustancias extrañas, sean éstas gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en concentraciones considerables y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes de uso y del paisaje"

Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas totales, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre entre otros.

La concentración de los contaminantes se mide en partes por millón (ppm o mg/m^3) o en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cada contaminante tiene un tiempo específico de exposición.

1.5.3 - Principales contaminantes que inciden en la velocidad de corrosión

El NaCl y el SO₂ (Berman, 1982) son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera, también es importante mencionar al sulfuro de hidrógeno, que es el responsable del deslustre de cobre y plata, los compuestos nitrogenados que en solución incrementan la humedad en la superficie de los metales, las partículas inertes (silicio) y las partículas absorbentes (carbón de leña).

Entre todos estos contaminantes, el SO₂ tiene una importancia especial en los procesos de corrosión atmosférica, a causa de su incidencia directa en la velocidad de corrosión de los metales expuestos a la atmósfera.

Los metales no ferrosos consumen SO₂ en las reacciones de corrosión, y sus productos principales son los sulfatos metálicos, mientras que en la oxidación del hierro y del acero los sulfatos ferrosos son hidrolizados formando óxidos y generando ácido sulfúrico.

Una característica importante del SO₂ es que es más soluble que el oxígeno, lo cual origina que cuando se producen concentraciones muy bajas en la atmósfera pueden obtenerse películas de humedad sobre la superficie metálica con altas concentraciones de SO₂, lo cual ocasiona el deterioro de la misma. Esto tiene una gran importancia, ya que estudios atmosféricos basados en técnicas de química analítica y en computadoras de alto poder resolutivo han llegado a la conclusión de que la composición de la atmósfera se ha convertido en un reservorio de gran cantidad de trazas de especies gaseosas.

A pesar de las bajas concentraciones en que se encuentran estas sustancias, frecuentemente representan un riesgo para la vida de plantas y animales, pueden alterar el clima y constituyen una aportación muy importante a los fenómenos de corrosión.

La mayoría de estas sustancias están presentes en la atmósfera a niveles más altos de los esperados en equilibrio termodinámico con el nitrógeno, el oxígeno, el bióxido de carbono y el vapor de agua. La composición de estas trazas está controlada por una serie de mecanismos cinéticos y engloban una combinación complicada de procesos químicos, físicos y biológicos.

Las perspectivas de usar pinturas anticorrosivas base agua son muy cuestionables debido a su carácter hidrofílico y alta densidad. Sin embargo, la aplicación de pinturas con alto contenido de sólidos formuladas a partir de resinas poliuretánicas, ureicas, cloropolímeros y epoxídicas ofrecen nuevas posibilidades y recursos.

Los daños por corrosión han sido la fuente de serios problemas sociales. Su ocurrencia en cañerías para el transporte de gas, agua, fluidos para calentamiento o medios de comunicación impactan negativamente sobre la calidad de vida de grandes segmentos poblacionales en ciudades y/o regiones enteras llegando, en ocasiones extremas, a provocar verdaderos desastres.

Las principales herramientas para proteger contra la corrosión son: aleaciones resistentes a la corrosión en diferentes medios de exposición, pinturas, recubrimientos poliméricos o metálicos usados solos o combinados entre si (sistemas dúplex), inhibidores y protección electroquímica, Tabla 4. La combinación de varias tecnologías para la protección anticorrosiva demostró ser más eficiente que el aumentar la eficiencia de una sola de ellas. Debido al acelerado progreso tecnológico, la obsolescencia de instalaciones protegidas debe ser un factor muy tenido en cuenta en el momento de diseñar la protección anticorrosiva.

1.5.4 - Calibración de la Atmósfera

Para poder determinar la corrosividad de una atmósfera es necesario relacionar entre sí todos los factores que la afectan, y muy especialmente aquellos que han demostrado tener una especial influencia en el proceso de corrosión: tiempo de humectación de la superficie metálica y cantidad de contaminantes —causantes de corrosión— que pueden depositarse en la superficie metálica.

Es de gran utilidad para la interpretación de los datos establecer la siguiente terminología:

Agresividad de la atmósfera. Es el potencial de la atmósfera para provocar corrosión en metales o aleaciones. Se puede medir con base en los siguientes parámetros ambientales: humedad, temperatura y contaminación.

Corrosividad de la atmósfera. Habilidad de la atmósfera para provocar corrosión en un sistema dado.

Tiempo de humectación. Periodo durante el cual una superficie metálica está cubierta por una película de electrolito (incluso adsorbida) que estimula significativamente la corrosión atmosférica.

Tiempo de humectación calculado. Tiempo de humectación estimado a partir de relaciones temperatura-humedad relativa.

Tiempo de humectación experimental. Tiempo de humectación determinado directamente por diferentes sistemas de medida.

Categoría de la contaminación. Característica cualitativa o cuantitativa determinada convencionalmente, que señala la cantidad de sustancias químicas activas, gases corrosivos o partículas suspendidas en el aire, tanto naturales como producidas por el hombre, diferentes de los compuestos ordinarios del aire.

Tipo de atmósfera. Caracterización de la atmósfera sobre la base de un apropiado criterio de clasificación: industrial, marina, urbana, etc., o de factores operacionales complementarios: química, etcétera.

Complejo temperatura humedad. Efecto conjunto de la temperatura y de la humedad relativa, que influye en la corrosividad de la atmósfera.

Tipo de localización. Condiciones de exposición típicas definidas convencionalmente a partir de un componente o estructura: espacio cerrado, bajo techo, aire libre, etcétera.

Caracterización de la atmósfera en relación con su agresividad. Para propósitos prácticos, se consideran como factores clave de la corrosión producida por la atmósfera los siguientes: tiempo de humectación, niveles de SO₂ y NaCl.

El grado de exactitud en la respuesta a las anteriores preguntas, tiene que ver con el objetivo de la caracterización de la fuente.

1.5.5 - Los contaminantes atmosféricos

Una sustancia se considera contaminante cuando al ser introducida directa o indirectamente por el hombre en el aire ambiente puede tener efectos nocivos sobre la salud humana o el medio ambiente en su conjunto.

En función de su origen los contaminantes pueden clasificarse en primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son aquellas sustancias que son vertidas directamente a la atmósfera por fuentes emisoras tales como chimeneas, procesos industriales, quema de combustibles fósiles. Estas sustancias representan más del 90% de la contaminación atmosférica.

Los contaminantes secundarios son los que se producen como consecuencia de las transformaciones por reacciones físicas y químicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera.

1.5.6 – Método de control de la corrosión atmosférica

Por lo dicho hasta el momento (Ailor, 1986; Liublinski, 1987) es evidente que la forma más efectiva de disminuir la corrosión atmosférica sería a través de la eliminación de las sustancias agresivas y en especial del SO_2 . Como esto no puede realizarse en equipos y estructuras situados en zonas industriales se requiere de técnicas de protección adecuadas. En interiores el aire acondicionado mantenido continuamente puede asegurar una atmósfera filtrada, limpia y seca, con una humedad relativa baja, pero su interrupción (por ejemplo, durante la noche) puede causar condensación de agua con la consiguiente iniciación de la corrosión.

Cabe señalar que un material resistente al ataque de un determinado tipo de atmósfera no necesariamente será resistente a otra. Existen diferentes tipos de recubrimientos para proteger especialmente al acero de la corrosión atmosférica. Por otra parte, también hay metales y aleaciones que son muy resistentes. Así, los aceros inoxidables y el aluminio, que tienen buena resistencia a la corrosión en atmósferas industriales, urbanas y rurales, no la tienen en las marinas.

Pequeñas cantidades de *aleantes* como cobre, fósforo, níquel y cromo incorporados al acero aumentan considerablemente su resistencia a la corrosión atmosférica. Algunos aceros de este tipo son los llamados *autopasivables*, por formar con el medio películas protectoras adherentes de composición compleja para lo que no se requiere de recubrimientos de pintura, la principal protección contra la corrosión atmosférica utilizada para el acero. Estos aceros *autopasivables* se emplean en la construcción de puentes, estructuras para edificios, etc., pero no en interiores, ya que al abrigo de ciertos componentes atmosféricos no forman dichas películas pasivantes.

1.5.7- Contaminantes en la atmósfera de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Las emisiones contaminantes que se producen en la Empresa Ernesto Che Guevara (Estudio de CECIGMA 2005) están conformadas principalmente por polvos en suspensión de los minerales y productos de níquel, gases (CO , SO_2 , NH_3) que provienen fundamentalmente de los diferentes procesos realizados en cada una de las plantas.

Polvo: el polvo generado en la diferentes plantas llega a la atmósfera principalmente por: sistemas de aspiración insuficientes, derrames y salideros de minerales por los sellos (falta de hermeticidad); el mal estado técnico de los electrofiltros y en el caso específico de la planta de hornos de reducción la limpieza del polvo se realiza por soplado lo que provoca grandes emisiones de polvo a la atmósfera.

Gases: los principales gases contaminantes que se generan en las plantas y que pasan a la atmósfera son: CO , SO_2 , H_2S , NO_x y NH_3 los cuales se generan por los diferentes procesos metalúrgicos del mineral para obtener el producto final; principalmente en los procesos de combustión del petróleo, la reducción calcinación y sinterización del mineral y en el proceso de lixiviación y lavado, donde estos pasan al medio ambiente principalmente por roturas, derrames y escapes por falta de hermeticidad en tuberías y ductos, etc.

El sistema de estructuras metálicas que soportan los turboareadores en la planta de Lixiviación se encuentra bajo los efectos de la contaminación por más de veinte años y no ha tenido un mantenimiento consecuente, reflejado en las inspecciones realizadas en los años 2005, 2006, 2007 y 2008. En los informes emitidos por el grupo de Corrosión de la Empresa Ernesto Che Guevara se señalan las principales deficiencias relacionadas con

estado técnico de las estructuras y se proponen soluciones paliativas para seguir operando, si embargo la carencia de materiales y la falta de mantenimiento oportuno continúan agravando la situación. Todo esto unido a errores de diseño y la no aplicación de revestimientos anticorrosivos ha traído como consecuencia que más del 80% de las estructuras se encuentran afectadas por la corrosión con pérdidas considerables de espesor y de sus propiedades mecánicas llegando a ocasionar averías de gran magnitud.

1.6 – Protección de estructuras dañadas por la corrosión atmosférica

Di Sarli (2004) llegó a la conclusión que los enormes daños producidos por corrosión que periódicamente son publicados en los medios masivos de comunicación reflejan la existencia de un serio problema de fallas en la protección anticorrosiva de equipos, máquinas, edificios, estructuras y sistemas de comunicación. Múltiples intentos destinados a evaluar tales daños han sido encarados más de una vez en distintos países, tal es el caso de la evaluación realizada en 1978 en Estados Unidos a petición del congreso de ese país estableció que las pérdidas totales anuales por corrosión eran del orden de 70.000 millones de dólares, aproximadamente un 4% de su Producto Interno Bruto (PIB); estimaciones efectuadas en otros países industrializados dieron resultados muy parecidos (1,8-4,2% del PIB). Sin embargo, ninguno de ellos promovió inversiones adicionales en investigación científica y desarrollos tecnológicos relacionados con la protección anticorrosiva.

Mijailovski (1989) aborda la temática relacionada con la corrosión atmosférica de los metales y los métodos de protección también reflejan los diferentes tipos de contaminantes, la composición química de la atmósfera y los límites de concentración permisible, aspectos que serán utilizados en esta investigación.

En el trabajo de Geracimienko (1987) se exponen técnicas y métodos para la protección anticorrosiva de equipos, máquinas y estructuras metálicas explotadas en diferentes medios, sin embargo no se refiere a cómo proceder en caso de atmósfera industrial altamente corrosiva como la tratada en esta investigación.

Strebkov (2005) propone un método de protección anticorrosiva para las estructuras metálicas que trabajan en ambiente industrial similar al estudiado, con una disminución del

consumo de pintura en un 18 % y el costo de los trabajos en un 20 %, con una garantía de vida útil de 6-7 años, lo que puede ser aplicable a las condiciones analizadas en el presente trabajo.

Es importante señalar que aunque existe una amplia información relacionada con el fenómeno de la corrosión y los efectos de la atmósfera en la vida útil de los metales, se han encontrado pocos trabajos con referencia de corrosión en atmósfera industrial similar a las condiciones analizadas.

Muños y Uruchurtu (2001) presentan una metodología para la caracterización de la agresividad de la atmósfera sobre los materiales metálicos estructurales en diferentes zonas urbanas de México, amparados por normas (ISO). A partir de datos ambientales se obtuvo la corrosividad del acero. La investigación muestra la clasificación de los contaminantes por los niveles de humectación, SO_2 y el ion cloruro (Cl^-) según norma (ISO 1989), sin embargo los valores obtenidos a través de las estaciones de monitoreos no reflejan una agresividad comparable con una atmósfera industrial cargada de aerosoles marinos y polvo.

Uno de los factores que determina primariamente la intensidad del fenómeno corrosivo en la atmósfera es la composición química de la misma. El SO_2 y el NaCl son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera. El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar. Lejos de éste, la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y núcleos de población, siendo el contaminante principal por su frecuencia de incidencia sobre el proceso corrosivo el dióxido de azufre (SO_2), proveniente del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre.

1.6.1 - La protección de estructuras metálicas con pinturas

El método mas utilizado (Galván, 1986) para la protección de estructuras e instalaciones industriales y marinas ha consistido en la aplicación de pinturas. La diversidad de los ambientes a los que pueden estar sometidas dichas estructuras e instalaciones ha obligado a desarrollar pinturas capaces de protegerlas con éxito en las condiciones mas severas que puedan presentarse.

1.6.1.1 - La pintura y su composición básica

Es un líquido homogéneo formado por unos sólidos (pigmentos) dispersos en una fase líquida (vehículo) y combinados con aditivos, capaces de transformarse en fase sólida al aplicarse en láminas delgadas que se adhieren firmemente al sustrato y proporciona propiedades protectoras y decorativas.

Se compone fundamentalmente de las siguientes partes principales:

- Pigmento
- Vehículo fijo o ligante
- Vehículo volátil o disolvente
- Aditivo

El pigmento proporciona la capacidad y el color, el vehículo fijo o ligante es el agente filmógeno que mantiene unidas las partículas del pigmento y proporciona la adherencia al sustrato, y el vehículo volátil es el disolvente cuya misión es disolver el ligante sólido y proporcionar la viscosidad adecuada para la aplicación.

La imprimación es la primera capa de pintura, por estar en contacto directo con el hierro contiene pigmentos anticorrosivos, debiendo tener buenas cualidades de humectación de la superficie metálica para asegurar la adherencia sobre ella y ser buen soporte para la capa siguiente.

Las pinturas utilizadas como capas intermedias deben contener pigmentos de estructura laminar (óxidos de hierro micáceo, micrómica, etc.) los que refuerzan la impermeabilidad del vehículo fijo

Las pinturas de acabado proporcionan el color final y el aspecto decorativo del sistema.

1.6.1.2 - Tipos de Pinturas

Atendiendo a la forma de secado se distinguen cuatro grandes grupos de pinturas (tabla 1.2), las que a su vez pueden combinarse entre sí, según las características de los procesos y de elementos a recubrir.

Tabla 1.2. Formas de secado de las pinturas

1	Secado Físico	Secan cuando el disolvente se ha evaporado Totalmente (clorocauchos, vinílicas, nitrocelulósicas)
2	Secado por oxidación	La película polimeriza al oxidarse con el oxígeno del aire (Pinturas que contienen aceites secantes o resinas alcídicas modificadas con aceites secantes)
3	Secado al Horno	Polimerizan por tratamiento térmico con tiempo y temperatura determinados, (ureas, melaminas, fenólicas)
4	Secado por reacción química	Son pinturas de dos componentes que se mezclan antes de la aplicación (epoxis, poliuretanos, silicatos de zinc)

No obstante el éxito de la pintura no depende solo de la capa y el espesor que se aplique, sino también de cómo se aplique y esencialmente del estado de la superficie metálica al realizar la aplicación. Ningún sistema de pintura proporcionara un óptimo resultado si la superficie sobre la que se ha aplicado no esta adecuadamente preparada.

1.6.1.3 - Standard de preparación de superficies

Las normas mas comúnmente utilizadas en Europa son las editadas por el Instituto Sueco de la Corrosión bajo el titulo “Svensk Standard SIS 05 09 00 -1967”, que distinguen cuatro grados diferentes de herrumbre(A, B, C y D) en las superficies de aceros laminados en caliente. Identifica igualmente el aspecto de la superficie ya tratadas según dos grados diferentes de preparación (St-2 y St-3) mediante raspado y cepillado con cepillo de acero, cepillado a maquina, esmerilado a maquina, etc. Y finalmente distingue las superficies para cuatro grados diferentes de preparación (Sa1, Sa2, Sa2 ½ y Sa3) mediante chorro abrasivo (arena y granalla).

1.6.1.4 Aplicación de recubrimientos anticorrosivos

Los factores más importantes (Pérez, 1997) en el momento de aplicar los recubrimientos anticorrosivos son:

- a) Estado de la superficie metálica
- b) Temperatura.
- c) Condiciones climáticas.

La temperatura ambiente baja durante la noche, por lo que el acero a la intemperie se enfría. Subirá de nuevo durante el día, pero más rápidamente en el aire que en el metal.

Esta diferencia puede dar lugar a que durante la noche se formen condensaciones de humedad sobre la superficie del metal, lo que sucederá si la temperatura de esta superficie es inferior a la del punto de rocío.

1.6.1.5 - Método de aplicación de recubrimientos anticorrosivos

Los métodos fundamentales de aplicación de recubrimientos están diferenciados por la forma de obtención de la película protectora:

- Con pistola
- Con brocha o rodillo

El porcentaje de sólido de un recubrimiento es el volumen de estos (materia fija) existente en 100 volúmenes de dichos sólidos. Puede determinarse experimentalmente de una forma muy sencilla: con un aplicador tipo BAKER, se deposita un espesor de la pintura sobre una placa de acero laminado en frío lo mas lisa posible y perfectamente limpia, dejándola secar convenientemente.

1.8 - Conclusiones del capítulo

- El análisis bibliográfico referido al fenómeno de la corrosión permitió profundizar en los elementos teóricos para investigar la influencia de los agentes contaminantes del proceso tecnológico en la atmósfera de la planta de lixiviación, así como su influencia en las estructuras metálicas instaladas en esa Planta.
- Se fundamentan las teorías que estudian el comportamiento de la resistencia mecánica de metales sometidos a medios agresivos.
- El análisis permitió hacer una selección de uno de los métodos y procedimientos para la protección anticorrosivo ya utilizado en otras áreas de la empresa con una experiencia de más de diez años.

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS

2.1 – Introducción

La realización de ensayos y experimentos en la rama de los materiales ha sido siempre una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas de averías en elementos y equipamientos industriales.

En el campo de las estructuras metálicas es importante realizar investigaciones que propicien las especificaciones de entrada de los modelos; así como la composición, estructura y propiedades de los materiales analizados.

En este capítulo se plantean como **objetivos**:

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.
2. Determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas de estructuras metálicas expuestas a atmósfera altamente corrosiva así como obtener la distribución en el dominio de las tensiones y deformaciones en las mismas por el método de los elementos finitos (MEF).
3. Definir los métodos para determinar los agentes contaminantes presentes en la atmósfera.

2.2. Determinación de la resistencia mecánica de estructuras metálicas

Para evaluar la resistencia mecánica de las estructuras es necesario conocer el estado de tensiones y deformaciones de las mismas. Lo que implica analizar ponderar las cargas estática que actúan sobre los elementos, tanto en pandeo (anexo 2), como en flexión (anexo 3).

Se distinguen (Fernández-Levy, 1988) dos tipos de solicitaciones en las estructuras analizadas:

1. Pandeo por compresión (flexión longitudinal)
2. Flexión

2.2.1. Determinación de la resistencia a la estabilidad por compresión

El pandeo o fenómeno de la pérdida de estabilidad se analizará en las columnas (anexo 2) y su objetivo es determinar la estabilidad y resistencia de la misma a partir de las condiciones de frontera, en las que entran a desempeñar un papel importante las cargas actuantes del sistema como resultado directo del peso específico de las estructuras metálicas que conforman las plataformas 1 y 2 y el sistema de turboareación, en éste intervienen:

1. líneas de conducción del flujo productivo.
2. volumen del turboareador.
3. peso específico de la cola.

Para definir las cargas actuantes se tuvieron en cuenta la relación entre el coeficiente de reducción de la longitud del elemento y el radio de giro mínimo, para su determinación se seguirá la metodología propuesta por Fernández-Levy (1988). Se designa como “ λ ”, se denomina esbeltez de la columna y se determina:

$$\lambda = \frac{\gamma L}{i_{\min}}; \quad (2.1)$$

Siendo:

$i_{\min}$ - radio de giro mínimo de la sección expresada por:

$$i_{\min}^2 = \frac{I_{\min}}{A}; [\text{cm.}]. \quad (2.2)$$

La tensión crítica crece en la medida que disminuye la esbeltez, dicha esbeltez límite propuesta por Euler (Atuzarra Herrer.) se determina:

$$\lambda_{\lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}} \quad (2.3)$$

Conociendo que:

$\lambda, \lambda_{\lim}$, son adimensionales

λ , depende de las características geométricas de la columna, mientras que

$\lambda_{\lim}$, depende de las propiedades mecánicas del material de que está compuesto.

José Antonio Sablón Leyva

σ_p - tensión límite de proporcionalidad; en MPa.

Un pequeño incremento de la carga axial por encima de la crítica va acompañado de grandes incrementos de la flecha y de las tensiones en la columna, razón por la cual P_{crit} se considera peligrosa.

2.2.1.1 - Cálculo de la carga crítica

La determinación de la carga crítica se realiza teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del material, la geometría de la estructura y los esfuerzos a los que están sometidas dichas estructuras.

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 E * I_{min}^2}{(\gamma * l)^2}; [Kgf] \quad (2.4)$$

Donde:

E - modulo de elasticidad del material; en MPa

I_{min} - momento de inercia mínimo; [cm^4]

l - longitud de la barra; [m]

A - área de la sección transversal; [cm^2]

γ - coeficiente de reducción de la longitud

$(\gamma.l)$ – longitud efectiva de la barra

2.2.1.2 – Determinación de la tensión crítica

Para el cálculo de la tensión crítica es necesario tener en cuenta las características geométricas de la columna y las condiciones de carga a las que está sometida, dicho cálculo se realizará empleando la fórmula de Euler (Feodosiev, 1985):

$$\sigma_{crit} = \frac{P_{crit}}{A} = \frac{\pi^2 E * I_{min}^2}{(\gamma * l)^2}; [Kgf / cm^2] \quad (2.5)$$

Con:

P_{crit} - carga crítica en pandeo que se determina:

$$[P_{crit}] = \frac{P_{crit}}{n_e}; [N] \quad (2.6)$$

Siendo:

$[P_{crit}]$.- carga admisible; Kgf

n_e , es el coeficiente de seguridad por pandeo el cuál es mayor que la unidad y con valores algo mayor que el factor de seguridad por resistencia. Los valores de n_e varían de acuerdo con el material del cual esté constituida la columna, según Fernández-Levy (1988) para los aceros $n_e = (1.8 - 3)$.

2.2.1.3 – Obtención de la condición de estabilidad

Es importante comparar las tensiones en la condición de estabilidad, pues esta da la medida del grado de resistencia de la columna para este tipo de sollicitación:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{crit}}{n_e A} \leq [\sigma_e] \quad (2.7)$$

Para lo que:

$$[\sigma_e] = \varphi [\sigma_c] \quad (2.8)$$

φ , coeficiente de disminución de la tensión admisible básica (o coeficiente de pandeo), este depende de la esbeltez y de las propiedades mecánicas del material.

Corregir φ

$$\varphi = \frac{\sigma_{crit} n}{\sigma_{lim} n_e}; \quad (2.9)$$

$$\sigma_{lim} = \frac{P_{lim}}{A}; \quad (2.10)$$

$\sigma_{lim} = \sigma_{fl}$, para los materiales plásticos

Condición de resistencia

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{lim}}{nA} \leq [\sigma_c] \quad (2.11)$$

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \quad (2.12)$$

n_1 , es el coeficiente que considera el error posible al determinar las cargas y las tensiones.

n_2 , es el coeficiente que tiene en cuenta la heterogeneidad del material.

n_3 , es el coeficiente de las condiciones de trabajo que tiene en cuenta el grado de responsabilidad del elemento.

n , coeficiente de seguridad

$n_1=1.2$ (considerando que las tensiones se obtienen con una exactitud mínima)

$n_2=$ para la relación $\frac{\sigma_{fl}}{\sigma_r}$

$n_3=1.3$ (considerando un grado medio de responsabilidad del material)

$\sigma_{máx}$, tensión máxima, en MPa

$[\sigma_e]$, tensión admisible a la estabilidad, en MPa

$[\sigma_c]$, tensión admisible a la compresión, en MPa

σ_{lim} , tensión límite, en MPa

P_{lim} , carga límite, N

σ_{fl} , tensión límite de fluencia; en MPa

En condiciones como estas el método de solución más exacto es la simulación y modelación por elementos finitos que se expondrá su metodología más adelante en el presente trabajo.

2.2.2 - Solicitación de Flexión

Las vigas sometidas a cargas estáticas se calculan (Fernández-Levy, 1988) teniendo en cuenta las condiciones de trabajo y las características geométricas de estas:

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{Fmáx}}{W_x} \leq [\sigma_c] \quad (2.13)$$

Donde:

$\sigma_{máx}$ – tensión máxima; en MPa

$M_{Fmáx}$ - momento flector máximo; Nm

W_x - módulo de resistencia a la flexión en la sección; cm^3

$[\sigma_c]$ - tensión admisible a la compresión; MPa

Una vez determinadas las tensiones máximas, se comparas con las admisibles del material.

2.3 – Aplicación del M.E.F en estructuras metálicas afectadas por la corrosión

De acuerdo con lo planteado en el epígrafe 1.6 del presente trabajo, para el estudio de las tensiones y deformaciones existentes en las estructuras más afectadas, se determinará que la condición de contorno aplicada en el extremo inferior de la columna será un apoyo fijo, mientras que el extremo superior estará sometido a la inducción de una carga longitudinal por compresión (ver anexo 2). Luego en la viga, ambos extremos serán considerados simple apoyos y el ala superior del perfil estará expuesta a la acción de una carga distribuida en el tramo BC (anexo 3).

2.3.1 – Formulación matemática de elementos finitos

Para pequeños esfuerzos (Zienkiewicz 2000) el sistema fijo de coordenadas cartesianas se denota como x, y, z o en forma indexada x_1, x_2, x_3 , de la misma manera los desplazamientos pueden ser denotados como u, v, w o u_1, u_2, u_3 . Por lo que es posible definir x_i como las coordenadas y u_i los desplazamientos siendo los rangos de i 1;2;3 para aplicaciones tridimensionales como es el caso. En forma matricial podemos definir el sistema de coordenadas de la manera siguiente:

$$x = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \quad 1.1$$

y los desplazamientos como:

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad 1.2$$

Las ecuaciones de balance de momento lineal se puede expresar de la manera siguiente:

$$\sigma_{ij} + b_i = \rho u_i; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad 1.3$$

Siendo:

σ_{ij} .- Componentes de los esfuerzos de Cauchy

b_i .- las componentes de la fuerza

El valor del momento de equilibrio con tensiones simétricas se expresa:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji};$$

Las condiciones de frontera en el dominio Ω dadas para los esfuerzos de tracción se definen como:

$$t_j = \sigma_{ji} n_j = t_i \quad 1.4$$

Para todos los puntos inscriptos en el objeto Γ_t el trabajo virtual se puede calcular como:

$$\int_{\Omega} \delta u_i \rho \ddot{u}_i d\Omega + \int_{\Omega} \delta \xi_{ij} u_i \sigma_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} \delta u_i b_i d\Omega - \int_{\Gamma} \delta u_i I_j d\Omega = 0 \quad 1.5$$

En el sistema cartesiano el tensor de zona se define:

$$\delta \xi_{ij} = \frac{1}{2} \delta u_{ij} + \delta u_{ji} \quad 1.6$$

Las tensiones del objeto se expresan:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{22} & \sigma_{33} & \sigma_{12} & \sigma_{23} & \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{zz} & \sigma_{yx} & \sigma_{yz} & \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad 1.7$$

y los esfuerzos:

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{22} & \xi_{33} & \gamma_{12} & \gamma_{23} & \gamma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{xx} & \xi_{yy} & \xi_{zz} & \gamma_{yx} & \sigma_{yz} & \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad 1.8$$

Siendo:

γ_{ij} .- tensor de simetría que es asumido teniendo en cuenta criterios de ingeniería con el valor:

$$\gamma_{ij} = 2\xi_{ij}$$

La aproximación de los desplazamientos de los elementos finitos y los desplazamientos virtuales se denotan en forma isoparamétrica por:

$$u(\xi, i) = N(\xi) \ddot{u}(t); \quad \xi u(\zeta) = N(\zeta) \delta \ddot{u} \quad \text{con} \quad x(\zeta) = N(\zeta) \bar{x}$$

Para computar los esfuerzos virtuales:

$$\delta \varepsilon = S \delta u = (SN) \varepsilon \ddot{u} = B \delta \ddot{u}$$

En los que la matriz de esfuerzo-desplazamiento se calculan como:

$$B = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \\ N_2 & N_1 & 0 \\ 0 & N_3 & N_2 \\ N_3 & 0 & N_1 \end{bmatrix}$$

Siendo arbitrario el parámetro virtual δu para el problema discreto se obtiene:

$$M \ddot{u} + P(\sigma) = f$$

Donde:

José Antonio Sablón Leyva

$$M = \int_{\Omega} N^t \rho N d\Omega$$

$$f = \int_{\Omega} N^t b d\Omega + \int_{\Gamma_1} N^t t d\Gamma$$

y

El término P es comúnmente referido a la divergencia de las tensiones o de las fuerza actuantes:

$$P(\sigma) = \int_{\Omega} B^t \sigma d\Omega$$

2.3.2 - Pasos para el modelado por el MEF en las estructuras más afectadas

1. Importar el elemento desde un gestor gráfico (Autocad; Proengineer; Inventor; Microsoft Project).
2. Crear el tipo de estudio a realizar
3. Asignar las constantes reales del elemento (si son necesarias)
4. Introducir las propiedades del material
5. Discretizar el modelo (según la precisión deseada)
6. Aplicar las condiciones de contorno (fuerzas y desplazamientos)
7. Asignar las condiciones para resolver el sistema (solución)
8. Interpretar los resultados (postprocesamiento)

2.3.2.1 - Condiciones de contorno estructurales

Las condiciones de contorno estructurales permiten determinar el comportamiento de un elemento bajo solicitaciones propias de diseño, estas son:

1. restricciones de desplazamientos
2. fuerzas aplicadas en nodos
3. presiones sobre los elementos
4. temperaturas
5. cargas volumétricas o de inercia (gravedad)

2.3.2.2 - Aplicación de solicitaciones y condiciones de contorno

Para la aplicación de las solicitaciones, condiciones de contorno (figuras 2.1 y 2.2) y tipo de solución mediante el menú principal de Cosmos DesignStar, se debe seleccionar el

procesador determinado “solución”. Una vez, dentro el menú que se despliega tiene el aspecto indicado en el apartado los pasos a seguir son:

1. Definir tipo de análisis.
2. Aplicar condiciones de contorno.
3. Aplicar solicitaciones: cargas puntuales, distribuidas, gravitatorias, etc.
4. Análisis y solución de los resultados.

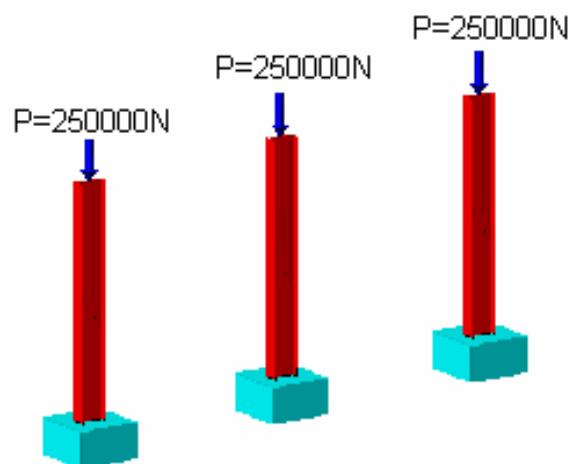


Figura. 2.1. Modelo para las columnas

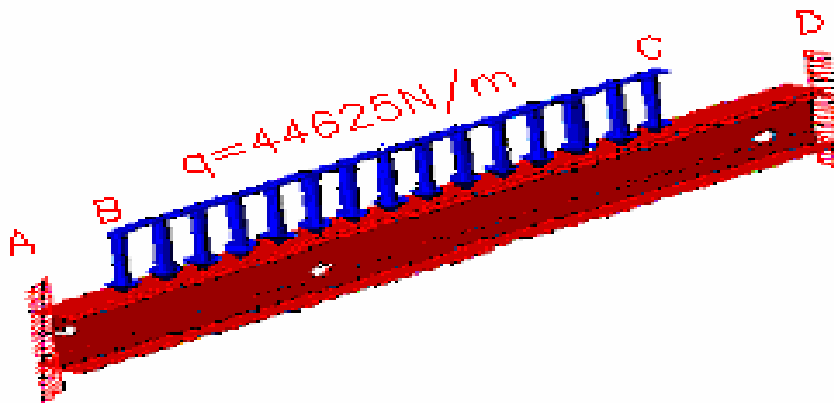


Figura. 2.2. Modelo para las vigas

2.3. Determinación de los espesores de los perfiles metálicos

Los instrumentos que se emplearon para la medición de espesores de los perfiles analizados son:

José Antonio Sablón Leyva

1. Cinta métrica
2. Pie de rey
3. Martillo de mano
4. Medidor de espesor ultrasónico DMS-2

La cinta métrica (ver figura anexo2.3), de longitud (5m), permitió medir la altura de la sección transversal y el ancho de ala, para ello la punta de la cinta fue fijada a un extremo del ala y extendida hasta el extremo próximo, extremo en que se registra el valor de la magnitud física. Las longitudes fueron medidas y comprobadas con los planos registrados de construcción (Km-18).

El pie de rey se utilizó para determinar los espesores de las alas de los perfiles. En la medición fue utilizado un martillo para embestir las superficies erosionadas y lograr en ellas una medición exacta. Luego se toma el pie de rey y se separan sus mandíbulas de modo que abrasen el esquadro de las estructuras y seguido se toma el valor de medida.

El medidor de espesor ultrasónico DMS-2 (ver anexo 2.4) fue empleado para determinar los espesores de las almas a lo largo de la sección transversal de cada una de las estructuras, para ello se hizo uso de un martillo para embestir las superficies erosionadas y de un cepillo de cerdas metálicas para eliminar gran parte de la capa de óxido formada en el material. Luego se toma el instrumento y se añade aceite de circulación en el patrón de prueba, este se encuentra en la parte inferior del teclado, una vez depositado el aceite, se hace frotar el sensor (parte componente del medidor, con el patrón y hasta que no aparezca en el display el valor predeterminado (10.45mm), no se puede proceder a la medición.

2.4 - Caracterización de la atmósfera.

Los instrumentos que se emplearon para La toma de muestras de los agentes de la atmósfera son:

1. Captador de bajo volumen de la firma AIR METRICS
2. Gasoanalizador portátil de la firma francesa OLDHAM
3. Estación meteorológica

Fueron tomadas muestras, en condiciones normales de producción, teniendo en cuenta los procesos tecnológicos fundamentales y las principales fuentes de emisiones difusas y fugitivas

Dentro del área la empresa se llevó a cabo una campaña de muestreo de polvos en suspensión. De forma general, los puntos de muestreo estuvieron ubicados en los lugares más críticos. La técnica para la determinación total del polvo en suspensión del aire se basa en la retención cuantitativa del polvo al pasar el aire a través de un filtro. La toma de muestras se realizó según la NC 19-01-31, mediante un captador de bajo volumen de la firma AIR METRICS.

La campaña de medición de gases en el interior de la empresa se realizó en condiciones normales de trabajo, atendiendo al mismo criterio de selección de los puntos que en la medición del polvo. En la toma de muestras, se utilizaron los métodos colorimétrico y pasivo, para la determinación de la concentración de los diferentes gases contaminantes en los puestos de trabajo. También se realizó una campaña de mediciones instantáneas utilizando un gasoanalizador portátil de la firma francesa OLDHAM equipado con sensores electroquímicos para la medición de SO_2 , H_2S , NH_3 y NO que tienen una sensibilidad de 0.1 ppm el SO_2 y de 1ppm para el resto de los gases.

2.4.1 - Mediciones de gases.

La campaña de medición de gases en el interior de la empresa se realizó en condiciones normales de trabajo, atendiendo al mismo criterio de selección de los puntos que en la medición del polvo. En la toma de muestras, se utilizaron los métodos colorimétrico y pasivo, para la determinación de la concentración de los diferentes gases contaminantes en los puestos de trabajo. También se realizó una campaña de mediciones instantáneas utilizando un gasoanalizador portátil de la firma francesa OLDHAM equipado con sensores electroquímicos para la medición de SO_2 , H_2S , NH_3 y NO que tienen una sensibilidad de 0.1 ppm el SO_2 y de 1ppm para el resto de los gases. Para encontrar la mayor concentración de SO_2 se empleó el método pasivo (midiendo en toda la planta).

Con el objetivo de determinar posibles situaciones críticas de emergencia, se realizó la toma de muestras instantáneas utilizando el gasoanalizador portátil, de manera tal, que se cubrieran las principales plantas de proceso y auxiliares; midiéndose en los sitios de

mayor incidencia de los contaminantes sobre las estructura y sobre el personal expuesto en cada una de ellas.

En la planta de Preparación del Mineral (Secciones de Secadero y Molienda) se realizaron 10 mediciones en el área de los electrofiltros. En el área de la Correa Caliente, se realizaron 5 mediciones para los mismos contaminantes. De la misma forma, se realizaron 10 mediciones en el área del Transportador TR-9. En la Planta de Hornos de Reducción, se realizaron 10 mediciones en el nivel 2 de la losa 2, con el gasoanalizador OLDHAM.

En la Planta de Hornos de Reducción, se realizaron 10 mediciones en el nivel 2 de la losa 2, con el gasoanalizador habilitado con los sensores para detectar SO₂, H₂S y NH₃, los que se comparan con los estándares.

2.4.2 – Meteorología de la empresa

Para la evaluación de la atmósfera corrosiva se muestreó cada 10 segundos con la estación meteorológica ubicada en la Empresa, de la cual se obtuvieron los datos de cinco años (2003-2007), los que dieron como resultados las variables: temperatura ambiente, características de las precipitaciones, velocidad y dirección de los vientos, así como la humedad relativa.

Del estudio realizado se pudo determinar la concentración de los agentes contaminantes de la atmósfera, así como los valores permisibles y aprobados por instituciones internacionales. Las mediciones fueron tomadas en todas las áreas de la Empresa con la ayuda de instrumentos calibrados y certificados para tales fines, los que fueron tabulados y analizados.

En la normativa internacional los principales contaminantes presentes en este tipo de actividad industrial, se encuentran sometidos a regulaciones distintas, según el país de que se trate (ver anexo 2.5 y 2.6)

2.5 – Metodología para la protección anticorrosiva

La protección anticorrosiva de las estructuras es de vital importancia para aumentar la vida útil de estas para lo que es necesario preparar las superficies hasta lograr los parámetros exigidos según normas y procedimientos establecidos y luego aplicar el recubrimiento acorde a las condiciones de explotación.

2.5.1 - Preparación y limpieza de las superficies de aceros

La calidad de la preparación de la superficie tiene una influencia decisiva sobre la vida de cualquier recubrimiento protector. La mayoría de los fallos prematuros que se dan en la práctica vienen motivados por una preparación inadecuada.

Hay que tener en cuenta que cualquier contaminante que se encuentre sobre la superficie del acero impedirá el íntimo contacto entre este y la pintura, influyendo negativamente en la adherencia entre el recubrimiento y el sustrato.

La capa de pintura no podrá así desarrollar toda su capacidad protectora y puede ser incluso que se desprenda al cabo de cierto tiempo.

Algunos de los contaminantes más comunes son: polvo, humedad, aceites y grasas y poluciones ambientales.

Otro aspecto a considerar es la presencia de defectos mecánicos inherentes al propio acero o derivados de la construcción de la estructura que se va a pintar.

En muchas ocasiones se encuentran exfoliaciones, picaduras de corrosión, cordones de soldadura rugosos, entre otros, que si no se preparan adecuadamente antes de pintar, pueden provocar fallos prematuros del sistema protector.

2.5.2 - Chorreado abrasivo

El chorreado abrasivo es el mejor método para la limpieza de grandes superficies de acero.

El chorreado abrasivo consiste en la proyección de partículas de material abrasivo a alta velocidad y con una elevada energía cinética contra las superficies de acero a limpiar.

El impacto de las partículas de abrasivo contra la superficie provoca el desprendimiento de los contaminantes superficiales adheridos al metal, arrancando la cascarilla de laminación, la herrumbre, las poluciones ambientales, etc, y dejando una superficie limpia y con cierta rugosidad superficial que siempre favorece al anclaje posterior de la pintura.

Debido al estado de la superficie de los aceros que queremos recubrir, y basados en la norma ISO 8501-1 que define el grado de limpieza de una superficie, el chorreado abrasivo debe ser hasta el metal casi blanco grado Sa 2½, afín de conseguir que por lo

menos el 95 % de cada porción de la superficie total quede libre de cualquier residuo visible.

Finalmente se elimina el polvo de abrasivo con un aspirador o con aire comprimido limpio y seco. La superficie debe quedar de color grisáceo.

2.5.3 - Recubrimiento

Un sistema de pintura es un recubrimiento que se aplica en varias capas sobre un sustrato determinado, con la finalidad de protegerlo contra su posterior deterioro.

Cualquier sistema de pintura puede estar compuesto, como ya hemos dicho, por varias capas, que aunque suelen ser todas ellas de la misma naturaleza química, tienen diferente composición, recibiendo distintos nombres, a saber:

- Imprimaciones. Las capas de pintura que se encuentran en contacto directo con el sustrato.
- Capas de fondo a intermedias. Las que se aplican sobre la imprimación con el fin de ganar espesor e impermeabilidad sin aumentar innecesariamente el costo del sistema.
- Capas de acabado. Son las que están en contacto con el medio, generalmente con la atmósfera, y son las responsables del aspecto y color del sistema.

El sistema de pintado que proponemos reúne las características como para alargar la vida útil del complejo de estructuras que nos proponemos proteger.

2.5.4 Aplicación del sistema epoxy – poliuretano

Los productos epoxy pueden combinarse con los poliuretanos y obtener así sistemas que presentan óptimas prestaciones anticorrosivas y protectoras en general a la vez que excelente retención de brillo y color.

1 capa de imprimación epoxy	125 micras
1 capa intermedia de epoxy	125 micras
1 capa de acabado poliuretano	60 micras
Espesor total recomendado	310 micras

2.6 - Conclusiones

1. Se estableció la metodología de cálculo adecuada a solicitudes de pandeo y flexión en perfiles de acero CT-3.

José Antonio Sablón Leyva

2. Se establecieron los métodos para caracterizar la atmósfera a partir de la concentración de los contaminantes y su relación con los agentes atmosféricos.
3. Se propone un método para la protección anticorrosiva de los metales en condiciones de atmósfera altamente corrosiva.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1 - Introducción.

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemático-estadísticas que describen las regularidades del comportamiento del acero CT-3 sometido a solicitaciones de pandeo (flexión longitudinal) y flexión. Se realiza además una evaluación del comportamiento de la resistencia mecánica de las estructuras de acero CT-3 expuestas a atmósfera altamente corrosiva.

El objetivo del capítulo es:

Realizar la valoración de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2 - Determinación de los espesores de estructuras metálicas afectadas

Para el estudio de la resistencia mecánica de estructuras metálicas sometidas a esfuerzo de tensión (columnas y vigas de acero CT-3) pertenecientes a una miniserie de la primera etapa del proceso de lixiviación de la empresa Ernesto Che Guevara se tuvo en cuenta el número de elementos (20 columnas y 46 vigas de perfiles conformados, H-700 y H-300) que soportan el peso de todos los equipos y accesorios además de las tubería.

3.2.1 - Espesores de las columnas afectadas

Para el análisis tensional de las columnas se realizaron 10 mediciones a lo largo de la sección transversal de las mismas, registrados en la tabla 3.1 (ver anexo 3.1). Como puede observarse (figura 3.1) los espesores promedios varían desde los 10,5mm hasta los 17mm en las columnas más afectadas, existiendo una reducción de casi un 81,25% en las zonas más dañadas respecto a su espesor nominal (20mm), fundamentalmente las, que están cercanas a los turboaeradores y además están sometidas al ataque de flujos directos cuando se producen derramamientos por reboso. Los valores mínimos más significativos estuvieron en los perfiles 1,2, 3,19 y 20, donde los valores estuvieron por debajo de los 5mm.

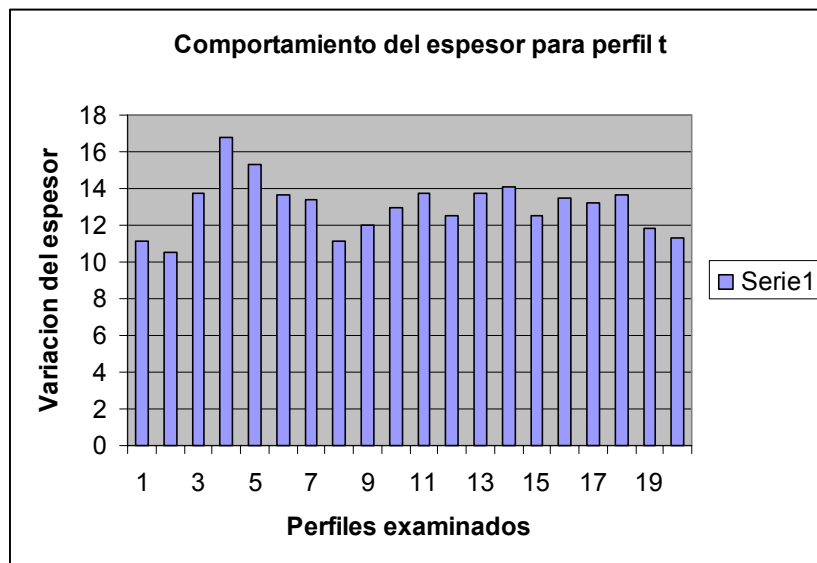


Figura 3.1 Espesor de los perfiles doble T de las columnas

3.2.2 - Determinación de los espesores en las vigas

El análisis tensional de las vigas arrojó valores promedios inferiores a los 10,5mm para la viga No.1, existiendo una reducción de un 81,25% respecto a su espesor nominal (20mm) en las zonas más dañadas, principalmente en las más próximas a los turboaeradores, las cuales están sometidas al ataque de flujos directos cuando se producen derramamientos por reboso. Los valores mínimos más significativos estuvieron en los perfiles 1,2, 14,19 y 20, donde los valores estuvieron por debajo de los 6mm.

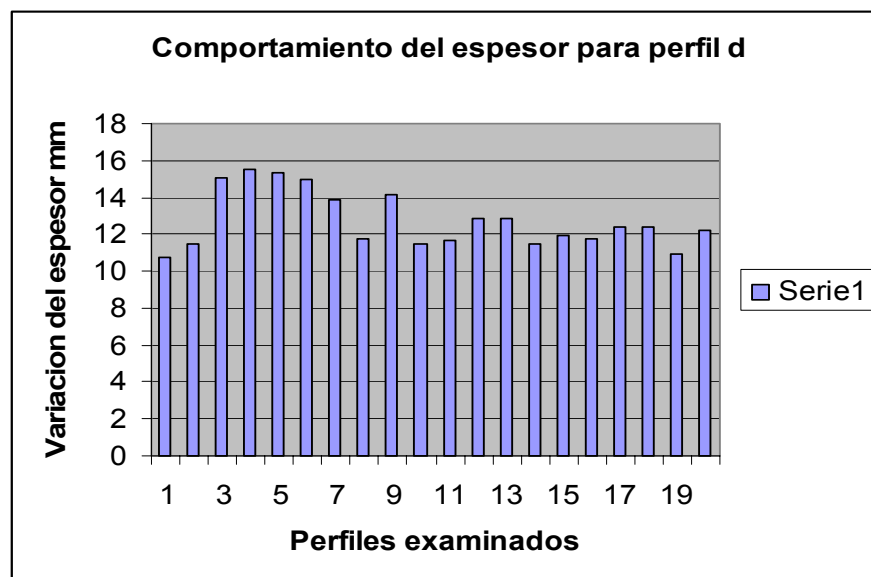


Figura 3.2 Espesor de los perfiles en T de las vigas

De acuerdo con los valores de espesor medidos, se tomó para el cálculo de pandeo o flexión longitudinal, la magnitud promedio mínima (10 mm), tanto para el ala como para el alma, luego teniendo en cuenta su característica geométrica se determinó el área de la sección transversal actual de la estructura.

$$A=143\text{cm}^2$$

3.3 - Cálculo de la resistencia mecánica de vigas y columnas afectadas

La resistencia mecánica de vigas y columnas en atmósfera altamente corrosiva se ve afectada, fundamentalmente debido a la reducción considerable de su sección transversal de trabajo.

3.3.1 - Cálculo de pandeo de las columnas

El pandeo es un fenómeno que se verifica en el sentido de la menor inercia de la sección transversal en estructuras afectadas por la corrosión o sea en el caso de la columna comprimida (figura 3.1), para el que se empleó la ecuación 2.2 con el eje de las “y” para las que el valor de:

$$I_y = 10671\text{cm}^4$$

Con radio de giro mínimo:

$$i_{\min} = 0.0864\text{ m}$$

Sustituyendo, se obtiene una esbeltez:

$$\lambda = 166$$

La carga crítica es la que origina en la columna un estado de equilibrio indiferente, para su cálculo se empleó la ecuación 2.4, conociendo que el material de estas es acero CT-3 con módulo de elasticidad de $E = 2.1 \times 10^5\text{ MPa}$ y longitud de la columna de $l = 6\text{m}$

Por lo que el valor obtenido es:

$$P_{\text{crit}} = 995489,37\text{N}$$

Una vez determinada la P_{crit} se procede al cálculo de la tensión crítica, aquella que define la fase de estado de un elemento sometido a esfuerzos de tensión bajo la acción de cargas, a través de la expresión matemática de la ecuación 2.5 y su valor es:

$$[\sigma_{crit}] = 69,6 \text{ MPa}$$

Para el análisis de la condición de estabilidad el coeficiente de reducción para las tensiones admisibles escogido de acuerdo a la esbeltez y el tipo de material de que está compuesta la columna fue $\varphi = 0,27$, luego se corrigió por la ecuación 2.9 obteniéndose $\varphi = 0.29$

Se determinó la tensión admisible a la estabilidad mediante la ecuación 2.8 obteniéndose un valor de:

$$[\sigma_e] = 35,56 \text{ MPa}$$

El coeficiente de seguridad a la resistencia para estructuras que exigen rigidez debe oscilar de (2.6 – 4).

Con el análisis de estabilidad en la expresión 2.7 se obtiene que la tensión máxima es:

$$[\sigma_{max}] = 26,78 \text{ MPa}$$

Como $\sigma_{máx} < [\sigma_e]$ entonces no hay pérdidas de estabilidad.

Para la condición de resistencia analizada en la ecuación 2.11 se obtuvo que la tensión máxima es:

$$[\sigma_{max}] = 90,9 \text{ MPa}$$

El significado físico de este resultado expresa que por cada cm^2 la columna está sometida a 90,9MPa de esfuerzo, valor este que está próximo al admisible, existiendo un coeficiente de seguridad de 1,33, muy por debajo del permisible por lo que se puede plantear que para un espacio de tiempo no muy lejano se producirá un colapso de la columna.

3.3.2 - Análisis de las vigas sometidas a flexión

La sollicitación de flexión fue realizada a través del software Mecasoft en el cual se pudo determinar mediante el diagrama de esfuerzo cortante y momento flector máximo el punto de incidencia de la carga distribuida

Los valores de esfuerzo cortante, momento flector máximo, reacción izquierda, reacción derecha y línea de acción de la carga distribuida determinados en el software Mecasoft son los siguientes:

$$Q = -133 \text{ N}$$

José Antonio Sablón Leyva

$$M_{f_{\max}} = 175 \text{ N/m}$$

$$S = 2,85 \text{ m}$$

Por lo que la tensión máxima surgida, se determinó a través de la expresión 2.13, sustituyendo, su resultado es:

$$\sigma_{\max} = 1250 \text{ Kg/cm}^2$$

Este valor de tensión máxima representa que la falla es inminente debido a que se alcanzado el valor de tensión admisible, y en un intervalo de tiempo no muy lejano se producirá el colapso.

3.4 - Análisis de los resultados de la simulación por Elementos Finitos.

En la figura 3.3 se representa el análisis de pandeo a través de la modelación por el MEF en una columna sometida a una carga estática de 250 000N según las condiciones de trabajo. La columna experimenta en su extremo superior un desplazamiento máximo de $3,27 \cdot 10^{-4}$ m el cual es despreciable para producir fallas.

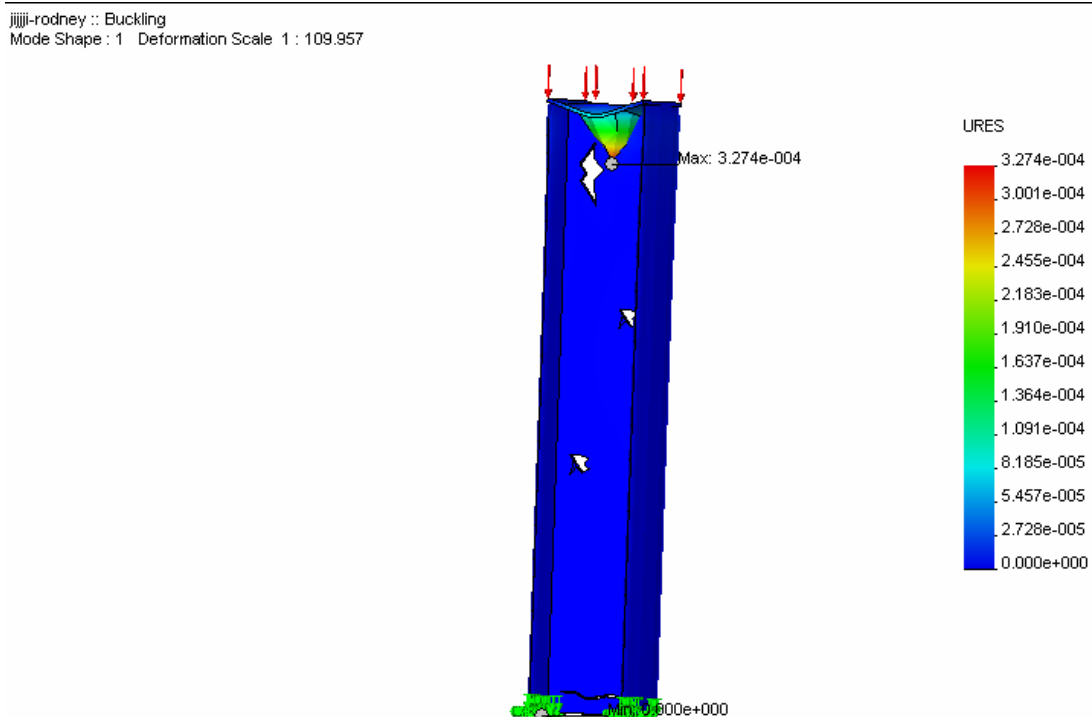


Figura 3.3. Desplazamientos de la columna comprimida por pandeo.

Los resultados de la simulación realizados a las de la figura 3.4 muestran que la tensión se distribuye a lo largo de toda la columna, desde los valores máximos (color rojo), hasta

valores mínimos (color azul), siendo el máximo valor de tensión 91,13MPa y se distribuye hasta la frontera de la perforación superior conectándose con las grietas surgidas producto de la corrosión. Además en la base, donde ocurre el empotramiento se observan esfuerzos próximos a las grietas presentes.

re-re :: Static Nodal Stress Top
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 181.71

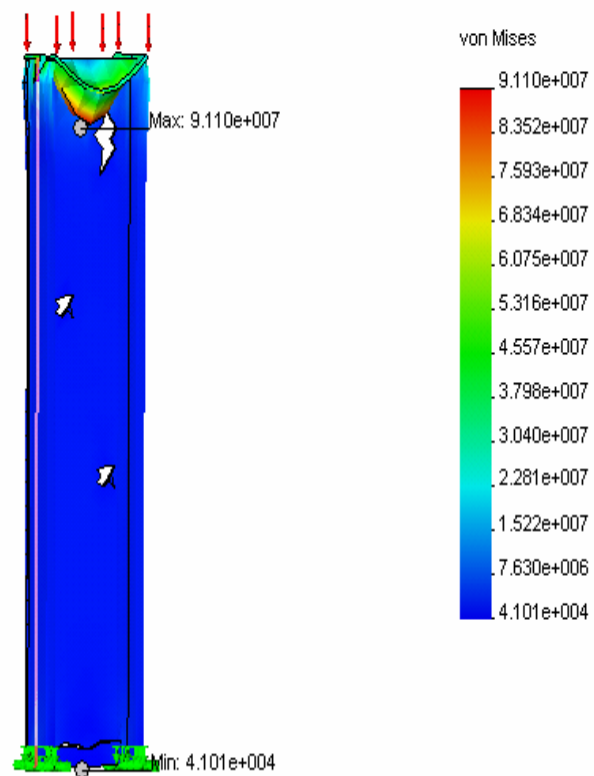


Figura 3.4. Comportamiento de las tensiones en la columna

La figura 3.5 demuestra de acuerdo a las condiciones de trabajo de la columna, un factor de seguridad igual a 1,37 el cual no garantiza resistencia mecánica y rigidez debido a que su valor sale del dominio comprendido por las normas de diseño, para elementos sometidos a la acción de cargas es preciso que su coeficiente de seguridad esté entre 2,5 y 4 con el objetivo de lograr una óptima resistencia y fiabilidad de los mismos. Otro punto ineludible a tratar es la influencia de la carga aplicada en la parte superior, la cual se proyecta hasta cada uno de los cráteres y grietas existentes reduciendo así su longevidad.

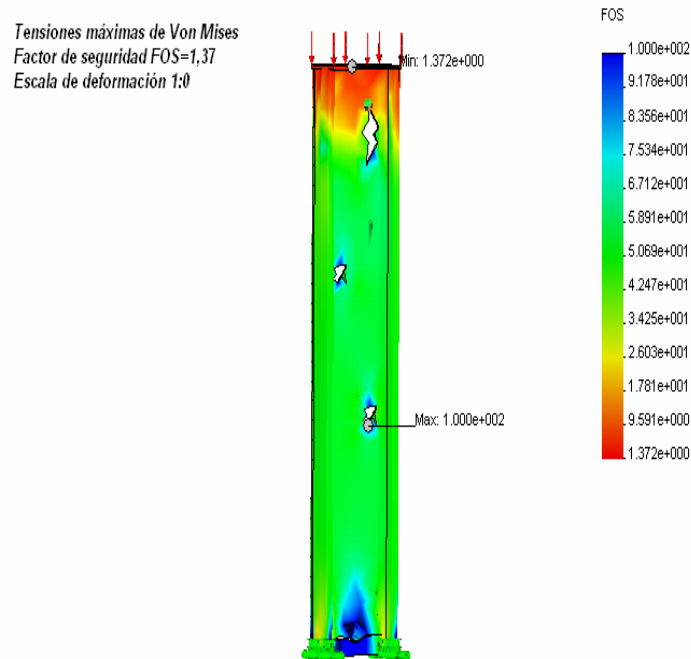


Figura 3.5. Comportamiento del factor de seguridad de la columna comprimida por pandeo

3.4.1 - Resultados de la simulación por Elementos Finitos para las vigas.

Las tensiones fluyen desde el punto de acción de la carga (2.85m) hasta las restricciones aplicadas en los extremos, donde se alcanzan valores máximos (ver figura 3.6), en las grietas de las perforaciones se reflejan esfuerzos actuantes que propician debilitamiento en las zonas de incidencia.

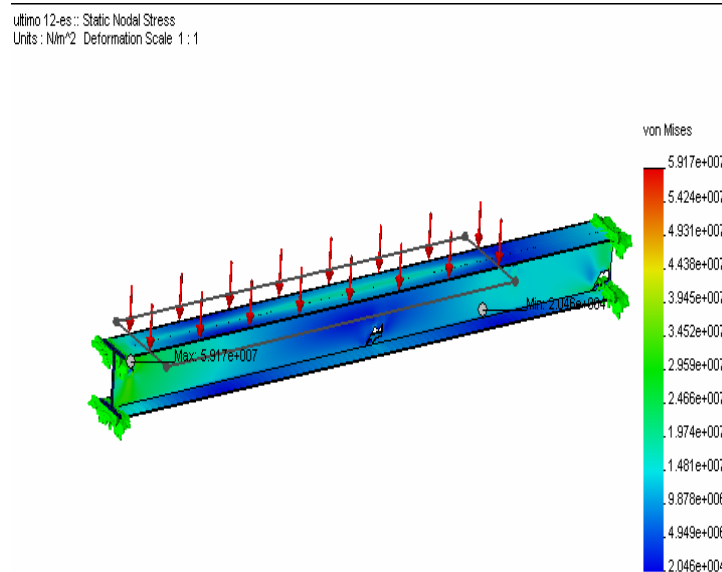


Figura 3.6. Distribución de las tensiones en las vigas de mayores longitudes

La figura 3.7 demuestra de acuerdo con las condiciones de trabajo de la viga, un factor de seguridad igual a 0.00075 el cual es muy pequeño y no garantiza resistencia mecánica y rigidez debido a que su valor está por debajo del dominio comprendido por las normas de diseño, aspecto ya explicado anteriormente, para lograr una óptima resistencia y fiabilidad de los mismos. Otro punto ineludible a tratar es la influencia de la carga aplicada en la parte superior, la cual se proyecta hasta cada uno de los cráteres y microfisuras estructurales existentes. Producto a la formación de estos, surgen cargas residuales que disminuyen en gran medida las propiedades físico-mecánicas de la estructura metálica y con ello su tiempo de vida útil.

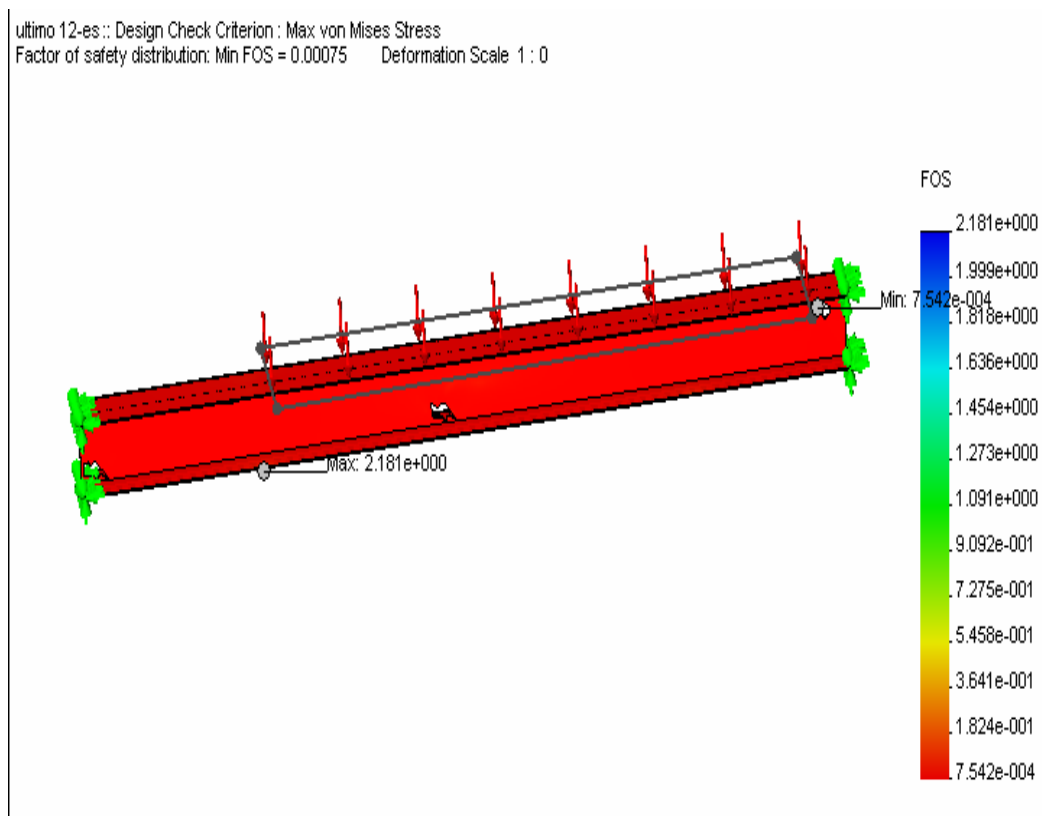


Figura 3.7. Distribución del factor de seguridad en las vigas de mayores longitudes

3.5 Caracterización de la atmósfera de la planta

A partir del estudio de las condiciones climáticas en la Empresa es posible resumir el comportamiento de los factores más significativos que caracterizan el medio ambiente. Además determinar los productos que depositados sobre la superficie metálica pueden contaminarla y acelerar los procesos de deterioro.

Dentro del medio se diferencian los factores naturales como humedad relativa, temperatura, precipitaciones, vientos y los factores contaminantes de la atmósfera. La humedad relativa es uno de los aspectos más importantes porque el vapor de agua existente en la atmósfera, al condensarse sobre la superficie de las estructuras metálicas, se convierte en el medio conductor necesario para que se produzca la corrosión electroquímica. La temperatura puede provocar efectos que parecen contradictorios, pero que están directamente relacionados con los valores de humedad. Cuando la atmósfera es húmeda, sobre todo cercanas a la saturación, un aumento de su temperatura suele aumentar la velocidad de corrosión.

Los contaminantes en la atmósfera de la planta y plantas aledañas afectan a las estructuras metálicas de soporte, es de vital importancia conocer las magnitudes de concentración de estos así como el comportamiento de las variables meteorológicas.

3.5.1 Mediciones de los polvos en suspensión

Los mayores niveles de polvos en suspensión se obtuvieron en el área de Secaderos con máximos de $23,5 \text{ mg/m}^3$, muy por encima del valor establecido por las normas, con valor máximo en el punto situado en la “Correa Caliente” (ver anexo 3.2). En esta zona se presentan altos niveles en la atmósfera fundamentalmente los que provienen de los hornos y de secaderos, los cuales presentan un bajo nivel de humedad y una granulometría pequeña, lo que facilita su dispersión hacia el medio ambiente.

El polvo depositado en las estructuras, si se tiene en cuenta la geometría de los perfiles, se acumula con el tiempo y forma una capa gruesa que favorece la concentración del agua y demás agentes de la atmósfera, lo que provoca que el proceso de corrosión sea mas intenso y agudice la pérdida de espesor de las estructuras en dicha zona, todo esto sumado a las deficiencias en el mantenimiento. Por ello el polvo se considera en este trabajo como un elemento importante a valorar y a proponer medidas que atenúen su efecto sobre todo en la introducción de inversiones con nuevas tecnologías.

José Antonio Sablón Leyva

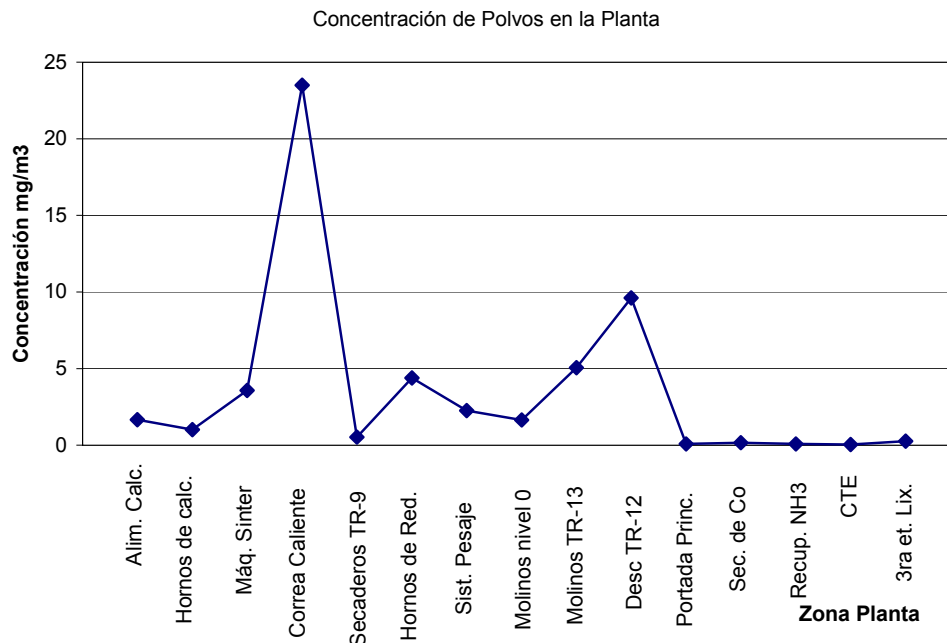


Figura 3.8. Concentraciones de polvos en las diferentes zonas de la planta

Los valores máximos de la concentración de polvo en suspensión fueron obtenidos en las plantas de Preparación de Mineral (secciones de Secadero y Molienda) y en la planta de Hornos de Reducción, próximo a la primera etapa de turboareadores de lixiviación y los valores menores, fueron obtenidos en las plantas de proceso hidrometalúrgico (anexo 3.2)

3.5.2 - Mediciones de gases.

La campaña de medición de gases en el interior de la empresa se realizó en condiciones normales de trabajo, atendiendo al mismo criterio de selección de los puntos que en la medición del polvo. En la toma de muestras, se utilizaron los métodos colorimétrico y pasivo, para la determinación de la concentración de los diferentes gases contaminantes en los puestos de trabajo. También se realizó una campaña de mediciones instantáneas utilizando un gasoanalizador portátil de la firma francesa OLDHAM equipado con sensores electroquímicos para la medición de SO_2 , H_2S , NH_3 y NO .

Con el empleo del método colorimétrico se observan máximos para el SO_2 (ver anexo 3.3) con valores obtenidos alrededor de los 0.07 mg/m^3 , dichos máximos se obtuvieron en el área del Edificio de Seguridad y Medioambiente (anexo 3.3).

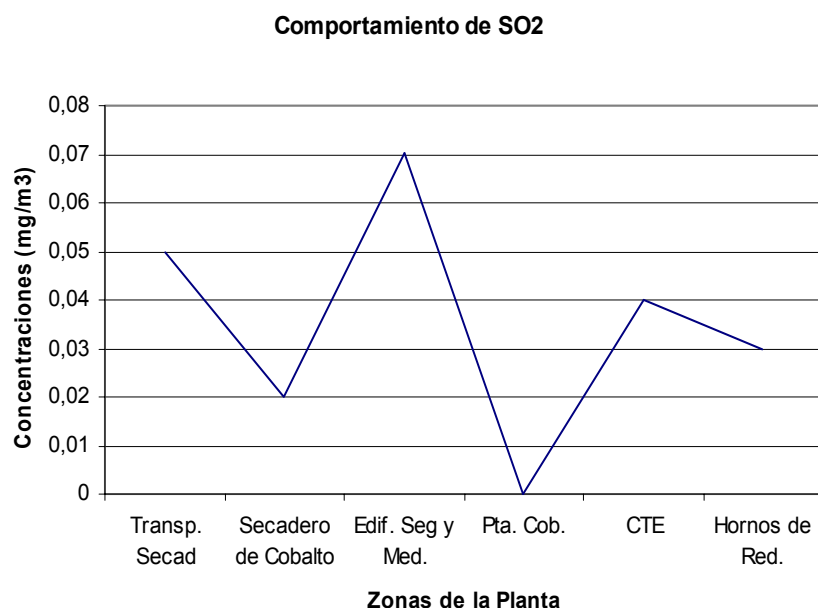


Figura 3.8 Valores de las concentraciones de SO₂ en la planta

Los valores máximo de H₂S obtenidos fueron 0.33 y 0.15 mg/m³ en la planta de Cobalto y en Secadero de cobalto respectivamente, los óxidos de nitrógeno obtuvieron sus valores máximos en la planta Termoeléctrica con un valor de 0.12 mg/m³, para el NO_x, el valor máximo de Amoníaco se obtuvo en la planta Termoeléctrica con un valor de 0.22 mg/m³. Todos estos valores que se obtuvieron por este método en las diferentes plantas dieron por debajo de las Concentraciones Máximas Admisibles (CMA) establecidas en la norma NC 19-01-03.

Por el método pasivo (anexo 3.3), se obtuvo que la mayor concentración de SO₂ fue encontrada en el TR-9 del área de Secaderos, con un valor de 3.43 mg/m³, lo que esta dado por los escapes de los gases que vienen de los Hornos de Reducción, debido a la falta de hermeticidad del ducto que conduce dichos gases hacia esta zona. Unido a esto, existen también escapes de gases por los sellos de los Secaderos y la cámara de paso, los que ascienden hacia esta área. Aunque estos valores de concentración de SO₂, están por debajo de la CMA, debe monitorearse periódicamente su comportamiento, pues los trabajadores están expuestos a valores cercanos al nivel límite admisible. Además, el proyecto de expansión prevé modificaciones en la sección de Secaderos, tales como poner en funcionamiento el Secadero # 7 y la posible utilización para la combustión, del crudo nacional con un alto porcentaje de azufre, lo puede traer aparejado un aumento en la generación de SO₂ durante el proceso.

Para el NO₂ el mayor valor se obtuvo en la zona de la descarga de los hornos de Calcinación, con una concentración de 0,12 mg/m³, estando este valor muy por debajo del nivel límite admisible establecido en las normas para puestos de trabajo.

Con el objetivo de determinar posibles situaciones críticas de emergencia, se realizó la toma de muestras instantáneas utilizando el gasoanalizador portátil en los sitios de mayor incidencia de los contaminantes.

En el área del Transportador TR-9, los resultados obtenidos para el SO₂ estaban comprendidos entre 0.1 y 1.2 ppm; para el NO, se obtuvieron dos mediciones con concentraciones de 1ppm y en el resto de los casos por debajo de umbral de sensibilidad del instrumento; para el H₂S la concentración en todos los casos, resultó inferior al umbral de sensibilidad del gasoanalizador. De manera general, en la planta no se registró ningún valor indicativo de situaciones de emergencia por contaminación de los gases anteriormente referidos.

En la Planta de Hornos de Reducción, se realizaron 10 mediciones en el nivel 2 de la losa 2, con el gasoanalizador habilitado con los sensores para detectar SO₂, H₂S y NH₃, detectándose en dos ocasiones, concentraciones máximas de 5 ppm para el SO₂, que igualan el valor de exposición corta STEL, establecido por la Occupational Safety & Health Administrations (OSHA). De manera general, el 90 % de las mediciones de este contaminante en esta área, arrojaron valores comprendidos entre 3 y 5 ppm, por lo que se recomienda el monitoreo continuo de este gas, y en función de los resultados, aplicar las medidas de protección previstas, dada la posibilidad de que ocurran con frecuencia eventos que superen los niveles STEL de contaminación del ambiente por este gas.

En el nivel 2 de la losa 1, se realizaron 10 mediciones con los sensores de SO₂, H₂S y NO y en todos los casos las concentraciones de los tres contaminantes estuvieron por debajo del umbral de sensibilidad del equipo de medición.

El máximo valor detectado para el H₂S es de 1 ppm, muy por debajo del STEL establecido por OSHA; mientras que en la concentración de NH₃, se obtuvieron mediciones en tres zonas por encima de los valores permisibles sin embargo en las restante áreas se mantuvieron por debajo de los niveles recomendados.

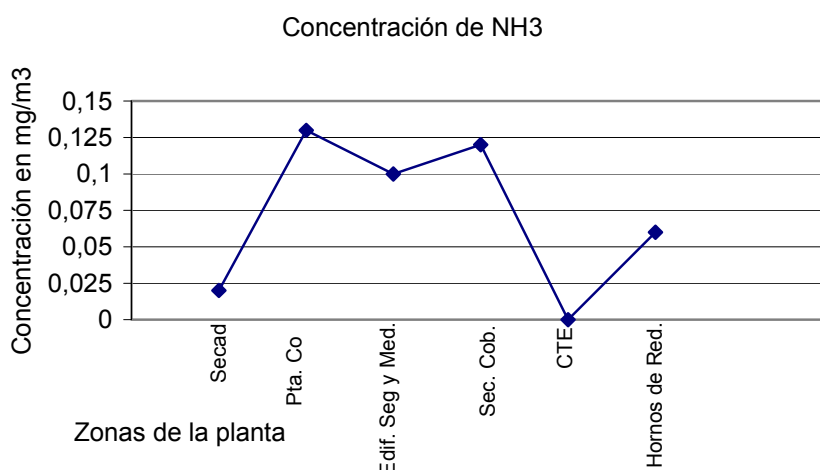


Figura 3.9 Valores de las concentraciones de NH₃ de la planta

En el nivel 23 losa 2 se realizaron 10 mediciones con los sensores de SO₂, H₂S y NH₃ y en todos los casos las concentraciones para el H₂S estuvieron por debajo del umbral de sensibilidad del equipo de medición. Para el NH₃ se obtuvieron tres valores de 1 ppm y el resto por debajo del umbral de sensibilidad, mientras que para el SO₂, se obtuvieron valores de concentración comprendidos entre 0.1 y 0.6 ppm, en general muy por debajo del STEL establecido por OSHA.

Se realizaron 10 mediciones en el edificio de Seguridad Industrial y Medio Ambiente con el equipo habilitado para medir SO₂, H₂S y NO, obteniéndose que todos los valores de concentración de NO se encuentran por debajo del umbral de sensibilidad del equipo de medición; los valores de SO₂, están por debajo de 1 ppm; y para el H₂S, se obtuvieron 4 mediciones de 1 ppm y el resto por debajo del umbral de sensibilidad del equipo de medición. En todos los casos muy por debajo del STEL establecido por la OSHA.

3.5.3 - Resultados de las variables meteorológicas

Las variables meteorológicas son elementos de importancia a tener en cuenta por cuanto ellas ejercen una influencia marcada sobre la corrosión en estructuras, ya sea atenuando o reforzando su efecto.

3.5.3.1 - Comportamiento de la temperatura.

Los registros obtenidos con ayuda de la estación meteorológica de la empresa (ver anexo3.4) muestran el comportamiento de las temperatura en un periodo de cinco años, donde se observa como tendencia el incremento de esta a partir del mes de junio y hasta

José Antonio Sablón Leyva

octubre, siendo los meses más cálidos agosto y septiembre, los que alcanzan valores de hasta 35°C. En el grafico 3.10 se muestra el comportamiento promedio mensual durante los años 2003-2007 de las temperaturas.

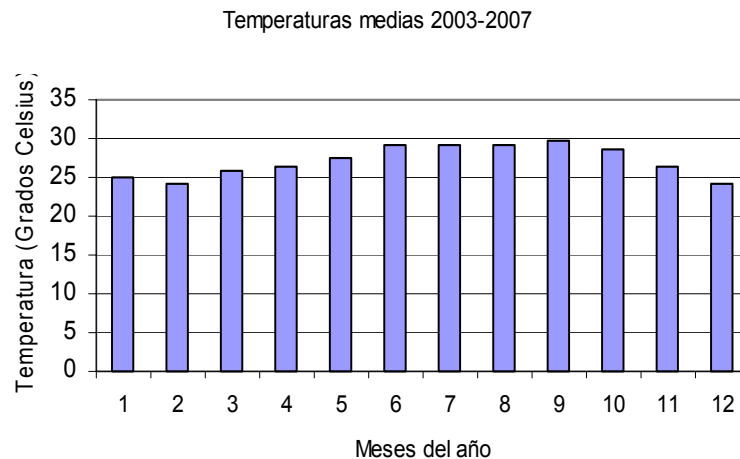


Figura 3.10 Temperaturas medias en la empresa

3.5.3.2 – Análisis de las precipitaciones

Las precipitaciones muestran un comportamiento irregular, siendo octubre el mes más lluvioso del año con promedios que superan los 185mm, como se puede observar en la figura 3.11 el mes más seco es febrero con medias que no superan los 50mm. Se aprecia una fluctuación de las precipitaciones en los restantes meses (anexo 3.5).

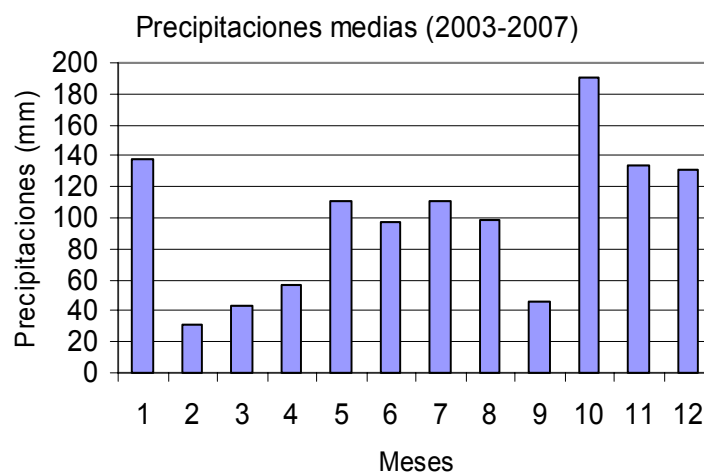


Figura 3.11 Valores las precipitaciones 2003-2007

3.5.3.3 - Velocidades de los vientos

El grafico 3.12 muestra el comportamiento de la velocidad del viento como promedio mensual durante los años 2003-2007, en el mismo se puede apreciar que los meses de enero y julio alcanzan los valores más significativos de hasta 12 km/h.

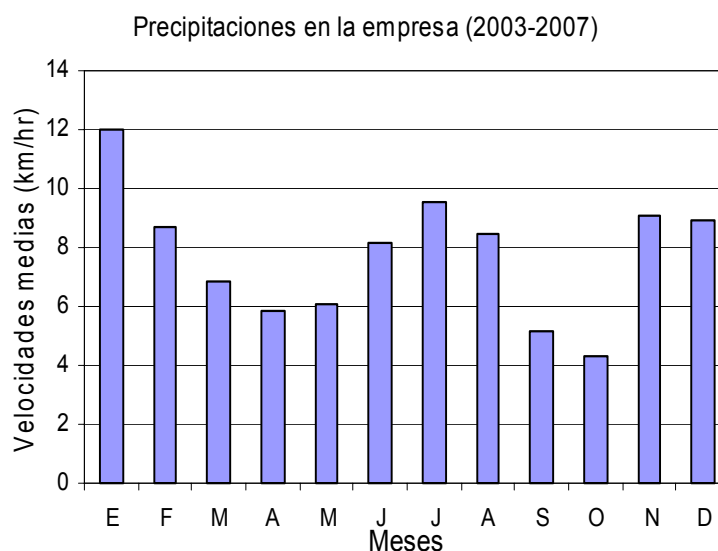


Figura 3.12 Valores de velocidad de los vientos 2003-2007

3.5.3.4 - Humedad relativa

Se puede decir que es difícil formular recubrimientos de superficies orgánicas que sean completamente impermeables a la humedad. Las partes de la película de menor espesor o las roturas producidas mecánicamente tienden a convertirse en ánodos en los cuales empieza la oxidación. El óxido de hierro ocupa mucho más volumen que el metal puro a partir del cual se forma y se expande aún más cuando absorbe agua. La atracción de agua es tan grande que la aspira a través de una película de pintura, de manera que cuando hay óxido en el sustrato la transmisión de humedad es mayor que la que pasa debido a la permeabilidad normal de la película.

Se ha comprobado que el espesor de las capas formadas por condensación de humedad sobre las superficies verticales oscila entre 10-50 μm , ya que las capas más gruesas tienden a escurrir. Sobre las superficies horizontales son posibles espesores de 50-100 μm y en casos excepcionales de más de 200 μm . La resistencia óhmica de la capa de electrolito es enorme y la disolución metálica es difícil. A espesores crecientes, la velocidad de corrosión aumenta por disminuir la resistencia de la capa de electrolito y además, la polarización anódica.

José Antonio Sablón Leyva

La llamada condensación química constituye otra forma de humectación, la cual se debe a las propiedades higroscópicas de ciertas sustancias depositadas sobre la superficie del metal y de los propios productos de la corrosión. Las precipitaciones atmosféricas, lluvias en particular, son causa directa de la formación de películas sobre la superficie de los metales.

Aún cuando cualquiera de estos factores justifique por sí la presencia de humedad sobre la superficie de los metales, su efecto sobre el espesor de la capa de electrolito es muy diferente. Normalmente, los mayores espesores se obtienen a temperaturas inferiores al punto de rocío o cuando el metal sufre la acción directa de la lluvia o niebla espesa.

La humedad relativa registrada a través de la estación meteorológica instalada en la empresa Ernesto Che Guevara refleja valores significativos con picos en el mes de junio por encima del 95% en el año 2004, lo mismo sucede en el mes de octubre del 2005 (Figuras 3.13 y 3.14). En el último trimestre de estos años se observa una tendencia al mantenimiento de esta por encima del 80% para ambos años. Este elemento en combinación con los agentes de la atmósfera presentes en la zona aceleran los procesos corrosivos, haciendo que el medio sea altamente agresivo.

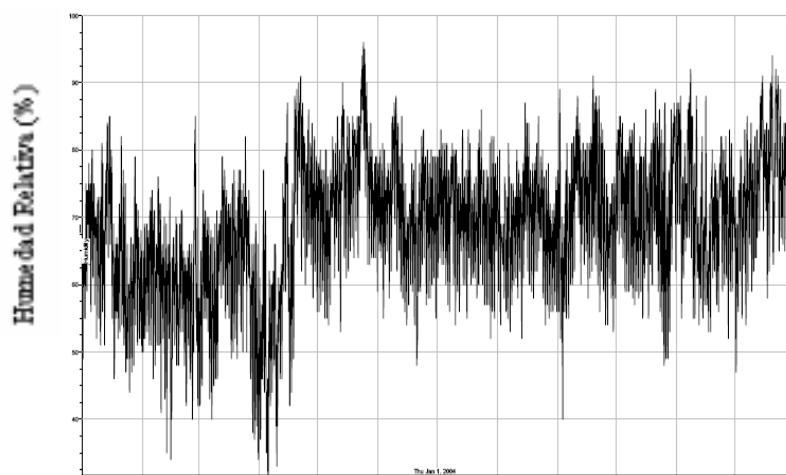


Figura 3.13. Humedad relativa año 2004

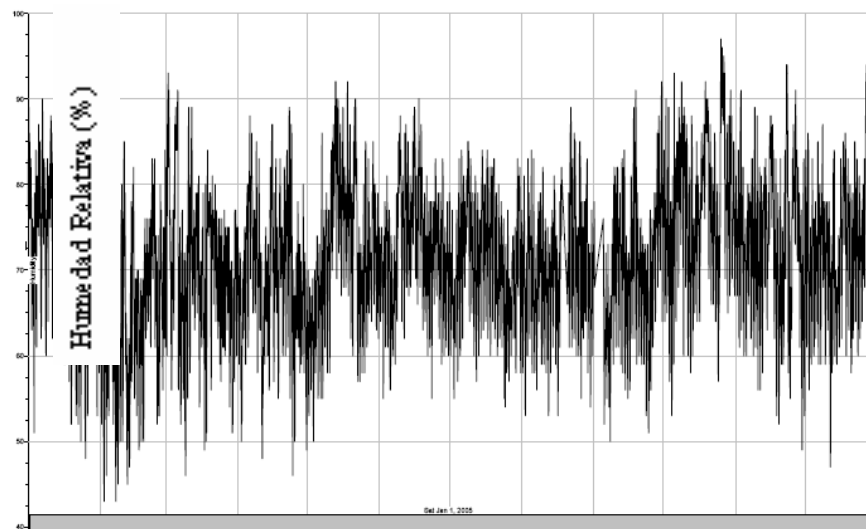


Figura 3.14. Humedad relativa año 2005

3.6 - Procedimiento para la aplicación de protección anticorrosiva

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, relacionado con el estado actual de las estructuras instaladas en la primera etapa de turboareadores en el área de lixiviación, así como la influencia negativa que ejerce la atmósfera altamente corrosiva se elaboró un procedimiento para la protección anticorrosiva (ver anexo 3.6), basado en un método moderno, el cual fue aplicado en la miniserie C de esta planta (ver anexo 3.7).

Las estructuras que conforman la miniserie de turboareadores abarcan un área de 7 400 m² más 240 m² hormigón. Como paso inicial se procedió a la preparación de la superficie por el método de chorreado de arena o granalla hasta lograr un acabado del metal libre de óxidos, incrustaciones, polvo y otros, similar al color gris comercial, para estructuras viejas y la limpieza total de la capa de laminación por este mismo método en el caso de los perfiles nuevos, lo que comprende un área de 4000 m² y limpieza manual para los turbos, barandas y vigas debajo de los turbos con un área de 3400m².

Con el objetivo de asegurar la calidad del proceso se controló la humedad relativa, la cual se comportó entre un 40-50%, la velocidad y el sentido de los vientos, así como la nubosidad del día. Otra de las reglas aplicada fue limpiar todo lo que iba a ser protegido durante el día.

Una vez comprobada la calidad en la preparación de la superficie se procedió a la aplicación de la pintura, para lo cual se utilizó la línea Devoxy 81 color crema como primario, con una relación de mezcla de 1x1, un 10% de diluyente del tipo “Devodil 15” y como limpiador “Devoclean 2”, asegurando un espesor de 100 micras, el rendimiento de 4m² por litro mediante un secado de tres horas. Como tiempo de repintado se estableció 24 horas máximo después de la primera capa.

Para el deposito de la capa de acabado se selecciono la mezcla al 1x1 de Devoxy 89 color gris con un rendimiento de 4m² por litro y alcanzando un espesor de 100 Micras, con un tiempo de secado de tres horas.

El trabajo fue ejecutado por la brigada No 7 de la ECRIN y el control se efectuó con la participación del personal técnico de la Empresa Ernesto Che Guevara, el cual certifico que se habían cumplido los parámetros de calidad establecidos en el procedimiento.

3.7 - Valoración económica

A partir de los resultados mostrados en esta investigación, donde se evidenció el grado de deterioro que presentan las estructuras metálicas que soportan los turboareadores en la planta de lixiviación, así como el peligro que ofrecen con un coeficiente de seguridad bajo (1.37) y amenazadas constantemente por una atmósfera industrial altamente corrosiva, influenciada fundamentalmente por emanaciones de SO₂ y NH₃, se hizo necesario la reparación capital de la miniserie C de turboareadores en la primera etapa, realizando la sustitución de todas las vigas y varias columnas dañadas por la corrosión. Para la ejecución de los trabajos se hizo un defectado general y se contrato a la brigada No7 de la Empresa Constructora y Reparadora del Níquel (ECRIN). Los materiales utilizados (Vigas y columnas) de perfiles H se localizaron en la Empresa inversionista las Camariocas, de procedencia Rusa y con iguales características químicas y mecánicas, o sea acero al carbono para construcción CT3 calmado. En una segunda etapa se le realizó un mantenimiento anticorrosivo a columnas y vigas para reducir su deterioro progresivo y garantizar una mayor vida útil. La supervisión y el control de calidad en la reparación, así como durante el proceso de protección anticorrosiva, lo realizo el personal del grupo de Corrosión de la Empresa Ernesto Che Guevara.

3.7.1 - Costo de la reparación capital

Para determinar el costo de la reparación capital se tuvieron en cuenta las partidas de gastos establecidas por la Empresa “Ernesto Che Guevara” las que comprenden los costo de materiales, mano de obra, gastos de transportación, costos directos e indirectos, este se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Partidas de gastos para determinar costo de la Reparación capital

Filas	Conceptos de gastos	Valores/CUC
1.	Materiales	98,621.04
2.	Mano de Obra	44,226.50
3.	Uso de Equipos	39,744.48
4.	Otros gastos directos en Obra	22,824.00
5.	Gastos generales de Obra	18,259.20
6.	TOTAL GASTOS DIRECTOS DE PRODUCCION	223675.23
7.	Gastos indirectos de obra(Coeficiente 0.1236)	27,646.26
8.	TOTAL GASTOS INDIRECTOS DE PRODUCCION	27,646.26
9.	SUBTOTAL DE GASTOS(6+8)	251,321.49
10.	Presupuesto independiente Facilidades Temporales	0.00
11.	Presupuesto independiente Otros Gastos Adicionales	000
12.	Presupuesto independiente Gastos bancarios (1.83%)	000
13.	Presupuesto independiente Seguro de la Obra (0.13%)	000
14.	Presupuesto independiente de imprevistos (5%)	000
15.	Presupuesto independiente transportación de suministros y Medios diversos del Constructor	2,005.81
16.	Presupuesto independiente Contribuciones, aportes pagos de derechos y tributos y otros pagos	000
17.	SUBTOTAL PRESUPUESTOS INDEPENDIENTES	24,624.75
18.	COSTO TOTAL	275,946.24
19.	UTILIDAD 20%	30540.09
20.	Precio del servicio de construcción	306,486.33

3.7.2 - Costos del mantenimiento anticorrosivo

Para la ejecución de la protección anticorrosiva también se contrato a la brigada No7 de la Empresa Constructora y Reparadora del Níquel (ECRIN). Se emplearon los indicadores explicados en el epígrafe anterior para el que se tuvo en cuenta los gastos de los materiales anticorrosivos, la preparación de las estructuras para la aplicación de dichos materiales y la mano de obra entre otros aspectos. El costo total de la protección anticorrosiva ascendió a los 52,960.77 CUC. Los gastos directos e indirectos se muestran en la tabla 3.2

José Antonio Sablón Leyva

Tabla 3.2. Partidas de gastos para determinar costo de la Protección anticorrosiva

Filas	Conceptos de gastos	Valores/CUC
21.	Materiales	13,994.24
22.	Mano de Obra	9.128.88
23.	Uso de Equipos	8.935.00
24.	Otros gastos directos en Obra	3.045.52
25.	Gastos generales de Obra	2.724.94
26.	TOTAL GASTOS DIRECTOS DE PRODUCCION	37828.58
27.	Gastos indirectos de obra(Coeficiente 0.1236)	4.675.61
28.	TOTAL GASTOS INDIRECTOS DE PRODUCCION	4,675.61
29.	SUBTOTAL DE GASTOS(6+8)	42,504.19
30.	Presupuesto independiente Facilidades Temporales	0.00
31.	Presupuesto independiente Otros Gastos Adicionales	000
32.	Presupuesto independiente Gastos bancarios (1.83%)	000
33.	Presupuesto independiente Seguro de la Obra (0.13%)	000
34.	Presupuesto independiente de imprevistos (5%)	34.00
35.	Presupuesto independiente transportación de suministros y Medios diversos del Constructor	929.21
36.	Presupuesto independiente Contribuciones, aportes pagos de derechos y tributos y otros pagos	000
37.	SUBTOTAL PRESUPUESTOS INDEPENDIENTES	4,754.59
38.	COSTO TOTAL	47,258.78
39.	UTILIDAD 20%	5701.99
40.	Precio del servicio de construcción	52,960.77

3.7.3 - Costos Total de Reparación

El costo total de reparación de la mini-serie “C” (primera etapa de turboareadores) en la planta de lixiviación comprende la suma de la reparación capital del sistema de estructuras y la protección anticorrosiva de estas ascendiendo a 359 447,1 CUC. Como se puede observar en los epígrafes anteriores el costo de la protección anticorrosiva solo representa el 17.3% del total, quiere decir que siguiendo las reglas de este procedimiento cada ocho años aproximadamente se puede realizar un mantenimiento anticorrosivo con un costo inferior, alargando la vida útil de las estructuras sin necesidad de reparar e invertir grandes sumas de dinero.

3.8 - Impacto social

Este trabajo aporta una metodología para la protección anticorrosiva de estructuras sometidas a una atmósfera altamente corrosiva, la cual permite alargar la vida útil de las mismas y al vez evitar que ocurran fallas y averías que pueden llegar a ser de gran

magnitud, ocasionado pérdidas económicas considerables, así como severos daños al entorno social y al medio ambiente en general. Para que se tenga una idea, todas los producto que intervienen en el proceso son tóxicos y al producirse una avería se derraman y contaminan el medio, no solo de la empresa sino también el entorno social aledaño, sumado a esto se pueden producir accidente del personal que labora en estas áreas. Esta investigación tiene gran importancia también en el orden económico, ya que permite ahorro por concepto de mejoramiento de la calidad de las estructuras que soportan el sistema de turboareadores en el proceso de lixiviación y evita hacer grandes inversiones en reparaciones.

Conclusiones del capítulo

- Los cálculo a pandeo y el análisis por el MEF demuestra que las estructuras metálicas sometidas a la acción de agentes corrosivos con la consiguiente pérdida de sección transversal poseen un bajo coeficiente de resistencia con la posible ocurrencia de una rotura catastrófica en periodo relativamente corto de tiempo.
- La caracterización de la atmósfera a la que está sometida la planta, muestra que los agentes fundamentales presentes en el aire son el SO_2 y el NH_3 además de altas concentraciones de polvos provenientes de la planta de hornos reducción y los procesos de molienda.
- Se realizó una valoración económica del empleo de las técnicas de conservación anticorrosiva.

Conclusiones Generales

- Se determinó mediante el análisis de pandeo y la MEF que las estructuras dañadas no ofrecen mucha resistencia a las cargas a las que están sometidas y que trabajan
- Los estudios realizados muestran que en la atmósfera los agentes fundamentales presentes son el SO_2 y el NH_3 y que existen elevadas concentraciones de polvos provenientes de otras plantas aledañas, elementos que unidos a las condiciones atmosféricas favorecen los procesos de corrosión y deterioro de las estructuras.
- Se definió y aplicó un método de protección anticorrosiva que permitirá incrementar la vida útil de estructuras afectadas por agentes corrosivos presentes en la atmósfera de la planta de lixiviación.

- La valoración económica arrojó que en la aplicación de alternativas de protección anticorrosiva se incurre en un gasto de 359 447,1 miles de pesos.

Recomendaciones

- Reforzar las estructuras dañadas con elementos de conexión (planchas y tablillas metálicas) y sustituir aquellas que ya han perdido su resistencia.
- Realizar un estudio que permita conocer la durabilidad de las estructuras a las que se le aplicó la protección anticorrosiva.
- Estudiar la velocidad de corrosión de los materiales de fabricación de las estructuras de la planta, bajo diferentes condiciones, para garantizar una protección más integral de estructuras como las analizadas en el presente trabajo.
- Analizar si es posible reducir los contaminantes de mayor incidencia sobre las estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

1. Ashurst John and Nicola (1988): practical building conservation. vol. 4: metals. Ed. Gower Technical Press. Aldershot, 1988 ISBN: 0291397484 (Biblioteca ETSAM: 69.059 ASH pra-4).
2. Asian Development Bank: Environmental Guidelines for Selected Industrial and Power Development Projects, 1987.
3. Ailor W.H. 1986 "Atmospheric Corrosion", John Wiley and Sons, Nueva York,.
4. Arroyave Posada C.E. 1995. El papel del no2 en la corrosión atmosférica del acero. Universidad: Complutense de Madrid.
5. Avila Ayon Verónica. 2005. Influencia de los parámetros medioambientales en la corrosión de elementos estructurales metálicos. Holguín. Cuba.
6. Banco Mundial. 1978. Environmental Considerations for the Industrial Development Sector. Office of Environmental and Health Affairs. Washington, D.C.: Banco Mundial.
7. Bilmes, P. 2000. El análisis y prevención de fallas metalúrgicas en la ingeniería de los materiales: Memorias del IV Taller Científico Internacional TECNOMAT' METANICA'2000. C. Habana.
8. Broto C. 2005. Enciclopedia de patologías de la construcción. Ed. Links International. Barcelona.
9. Biswas, A. K.; Geping, Q. 1987. Environmental Impact Assessment for Developing Countries. United Nations University, Natural Resources and the Environment Series, vol. 19. Tycooly Publishers, Londres,
10. Basu, P., Greenblatt, J., Wu, S., Briggs, D. 1989. Effects of Solid Recycle Rate, Bed Density and Sorbent Size on the Sulfur Capture in a Circulating Fluidized Bed Combustor. International Conference on Fluidized Bed Combustion, San Francisco, California, EE.UU.

11. Berman, I. M. 1982. Fluidized Bed Combustion: FBC presents a way to burn coal with minimal SO₂ and NO_x emissions. Development work is leading into demonstration units by a number of manufacturers, POWER ENGINEERING.
12. Boardman, R. D.; Smoot, L. D. 1989. Prediction of Fuel and Thermal NO in Advanced Combustion Systems; Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, March, San Francisco, California.
13. Bouzada Albela Francisco. 2001. Estudio mediante ruido electroquímico y metalografía del comportamiento frente a la corrosión de diferentes materiales metálicos. Universidad de V'igo.
14. Barranco Asensio V. 2003. Estudio de la corrosión en medio salino de distintos recubrimientos de zinc protegidos por microcapas orgánicas con cromo y libres de cromo. Universidad complutense de Madrid. España
15. Castro, M.A. 2001. Modelización computacional de tratamientos térmicos. Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
16. Cadena Villota F. X. 1998. ensayos de corrosión con acero al carbono sin protección y recubierto con revestimientos poliméricos. Universidad: politécnica de Cataluña.
17. CITMA-Holguín 2004. Apuntes del Modulo de Monitoreo Ambiental. Maestría de Gestión Ambiental. Cuba.
18. CECIGMA, 2005. Estudio del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera de la Empresa Ernesto Che Guevara. Holguín. Cuba
19. Dunbar S. R, y Showak W. 1982. *Atmospheric Corrosion*, W.H. Ailor (comp.), John Wiley, Nueva York,
20. Filatov G. V. 1993. Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov. Dnepropetrovsk Institute of Chemical Technology. pp. 59–64. Dnepropetrovsk.
21. Fernández Levi, G. 1988. Resistencia de Materiales. ED. Pueblo y Educación. La Habana. Cuba

22. Felú. S. y Morcillo. M, 1982. *Corrosión y protección de los metales en la atmósfera* (1, Ed. Bellaterra, Barcelona.
23. García Garino C, Gabaldón Castillo F, Goicolea J.Ma Ruigomez, Mirassoa, Raichman S. 2004. Simulación computacional del ensayo de tracción simple con estricción. Informe técnico proyecto PICT 12-03268: Empleo de métodos numéricos y experimentales. FONCyT - Agencia nacional de promoción científica y tecnológica. Universidad Politécnica de Madrid.
24. Gerdau Aza, S.A. 2001. Compendio de normas para productos de acero. (3ra. ed). Santiago de Chile.
25. Galván Sierra J. C. 1986. Estudio de la capacidad anticorrosiva de las películas de pintura mediante técnicas electroquímicas. Universidad complutense de Madrid. España.
26. Genescá J. y Ávila J, 1988). "Aspectos socioeconómicos de la corrosión", *Información Científica y Tecnológica* (CONACYT).
27. Gavelli G, Scala C y Colombari V, 1982. *Reliability of Engineering Materials*, Eds. A. L. Smith, Butterworths, Londres,
28. González Belén Chico. 2000. Corrosión en uniones solapadas de aceros recubiertos. Universidad: complutense de Madrid.
29. García Guillot A.M. 1998. Métodos de ensayo para imprimaciones de hormigón armado. efecto del oxígeno en la corrosión de armaduras. Universidad de Complutense de Madrid.
30. Geracimienko A.A. (1987). Protección de la corrosión, el envejecimiento y la biodegradación de maquinas, equipamiento y construcciones. Construcción de materiales. Moscú.
31. Guliaev, 1986. Ciencia de los materiales. Metalurgia. Moscú.
32. Hutton, D.V., Pullman, W.A. (2004). Fundamental of Finite Elements Analysis. Ed. McGraw-Hill. USA.
33. Joseph, R.S. (2004). Finite Element Analysis of Compression of Thin, High Modulus, Cylindrical Shells with Low-Modulus Core. *Design Engineering*

- Analysis Corporation, McMurray, PA.* By Tyco Electronics Corporation. EE.UU.
34. Juares Núñez Apolunio, Martínez Mirón Erica 1999. Porque medir la calidad del aire. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UAP.
 35. Krysl, P. (2005). A Pragmatic Introduction to the Finite Element Method for Thermal and Stress Analysis. Published by the Cooker Press. *Library of Congress Cataloging-in-Publication Data* California United States of America
 36. Lamber A. Herrero E, Libro de registro de datas y averías. Planta de Lixiviación: Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara, años 2000; 2001; 2002; 2004; 2005 y 2006.
 37. Lee, Y. Y.; Hiltunen, M. 1989. The Conversion of Fuel-Nitrogen to NO_x in Circulating Fluidized Bed Combustion, 1989 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, San Francisco, California, marzo de
 38. Liublinski E.Я. 1987. Protección electroquímica contra la Corrosión. Moscú. 'Metalurgia'.
 39. Martínez Laceras R. 1984. *Patología de las estructuras metálicas y mixtas*. Curso de rehabilitación. tomo 5. la estructura. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Madrid,
 40. Monjo Carrió J.; Maldonado Ramos L. 2001. Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas. Ed. Munilla-Lería. Madrid.
 41. Matsii S. I, Derevenets F. N. 2005. Application of finite-element method to investigate interaction between slide-prone soils and piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 42 (4), pp. 8-12. Springer Science+Business Media, Inc.
 42. Megson, T. H. 2000 Structural and Stress analysis. Second Edition. Ed. Butterworth-Heinemann. Oxford. UK.
 43. Miranda Vidales J. M. (2003). Análisis de la posibilidad de repasivación de las estructuras corroídas de hormigón armado. Centro nacional de investigaciones metalúrgicas-CSIC. Universidad: complutense de Madrid. España.

44. Merino Gómez Pedro. 1986. Estudios metalográficos de los diferentes tipos de corrosión: profundidad de los focos de ataque preferente. Universidad: Santiago de Compostela.
45. Morcillo. M. et. al., Rev. Iber. 1984. Corrosión y protección.
46. Merello Luna Rosario. 2000. Influencia de los factores composición química y estructura en la resistencia a la corrosión por picaduras de nuevos aceros austeno-ferríticos (duplex). Universidad: Cádiz.
47. Microsoft ® Encarta ® Biblioteca de Consulta 2005. © 1993-2004 Microsoft Corporation.
48. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. 2003. Situación ambiental en Cuba.
49. Norma European Standard .2004. Design of steel structures: Strength and Stability of Shell Structures. Brussels. Belgium.
50. Norma Cubana NC 19-01-03: 80 SNPHT. Aire de la zona de trabajo. Requisitos higiénico-sanitario generales.
51. Norma Cubana NC 19-01-31:82 SNPHT. Aire de la zona de trabajo. Determinación total de polvo.
52. Norma Cubana NC 19-01-36: 83 SNPHT. Polvos industriales. Clasificación y requisitos de seguridad.
53. Norma Cubana NC 19-04-13: 82 SNPHT. Sistemas de ventilación. Requisitos generales de seguridad.
54. Norma Cubana NC 26-1999.ATMOSFERA. Ruido en zonas habitables.
55. Norma ASTM, STP 558"Corrosión in Natural Environments", Filadelfia, 1974.
56. Norma ASTM, STP 435 "Metal Corrosión in the Atmosphere", Philadelphia, 1968.
57. Pérez Vázquez M. C. 1998. Corrosión de las armaduras en hormigón: estudio de los mecanismos de pérdida de la pasividad y modos de actuación para evitarla. Universidad de Vigo.

58. Pérez Pérez Carmen. 1997. Estudio de los sistemas de protección de las superficies metálicas expuestas a la intemperie. Universidad de Santiago de Compostela.
59. Perhac, R. M. 1989. Environmental Effects of Nitrogen Oxides, 1989 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, San Francisco, California,
60. Romano A, Piccinini N y Bello G. C, 1985. *Ingeniería química*.
61. Rodriguez Blasco M. T. 2004. Formulación y evaluación de imprimaciones epoxis anticorrosivos, curables a temperatura ambiente. Universidad: JAUME I DE CASTELLON.
62. Rosado Sainz-Rozas Covadonga. 2003. Desarrollo de nuevos recubrimientos para la protección contra el metal dusting. Universidad: complutense de Madrid.
63. Santana Rodríguez, J. J. (1998). Estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono en la provincia de las palmas mediante técnicas clásicas y electroquímica. elaboración del mapa de corrosividad. Universidad: Las Palmas de Gran Canaria. España. .
64. Soler Cantal Oller, 1998. Relaciones entre propiedades anticorrosivas y componentes de pinturas acrilico-estirenicas en emulsión. Universidad: Barcelona.
65. Spence J. W 1975. *Paint Technology* 47 (609)
66. Sánchez de Rojas Noguera M. J. 2003. Extracción electroquímica de cloruros: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento. Universidad de Alicante.
67. Symonds Jvidosic J. P, Hawkins H.V, Dodge D.D. Strength of Materials BY. *Columbus McKinnon Corporation, Tonawanda, N.Y. Supervisor (Retired), Product Quality and Inspection Technology, Manufacturing Development, Ford Motor Company.*
68. Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental en su Resolución 111/ 2002.
69. Sandro B.I, Roloff R, Birn S.M, Jawad H Maan J, Brown (1999). Mechanics of Solids. CRC Press LLC. Wisconsin Madison University. pp: 1475.

70. Torres de pinedo, A. J. 2003. Síntesis química y enzimática de nuevos antioxidantes lipofílicos derivados de compuestos fenolitos. Universidad: granada. España.
71. Zhuk .N.P 1976. Curso de teoría de corrosión y protección de metales. Metalurgia. Moscú.

Anexo 1.1 Fotos de estructuras afectada



Vista lateral de la miniserie C de turboareadores durante la reparación



Columna afectada por la corrosión



Vigas afectadas por la corrosión



Vista inferior de la miniserie C afectada por la corrosión

Anexo 1.2



EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA
GRUPO EMPRESARIAL DEL NIQUEL. MINBAS.
Carretera Moa-Baracoa km 5. CP83330. Moa. Holguín. CUBA. Pizarra: 6-8012 . Fax: 6-2240

UB MANTENIMIENTO/ Grupo Corrosión

PROCEDIMIENTO

Distribución - No: 1/2005

De: José A Sablón Leyva 385

Para: Raul Knight Pérez

Fecha: 28 de Febrero del 2005

Asunto: Defectado de los turboareadores de lixiviación

Informe sobre los resultados de la inspección realizada a los turboareadores de lixiviación en las Serie A,B,C y las etapas 1,2,3

Los turbos tienen como función lixiviar el níquel y el cobalto de la pulpa mediante la aireación con aire. Es decir, son reactores donde se verifican las reacciones químicas de oxidación de las diferentes especies químicas que componen el mineral reducido.

Datos constructivos:

- Espesor de la pared: 8.0 mm
- Diámetro: 4000 mm
- Altura: 5000 mm
- Material: Ac 20 K

Datos Tecnológicos

- Volumen: 63 m³
Temperatura trabajo: 30-50 °C
- Composición fase líquida: NH₃ – 0.06 %; CO₂ – 0.03 %; Ni – 0.012 %; H₂O – 0.898 %

Se efectuó examen visual del 100% de los elementos que conforman las Series A,B,C en todas sus etapas.

- Tanques(techo, pared y fondo)
- Columnas
- Vigas
- Piso
- Escalera

Como resultado de la inspección se comprobó lo siguiente:

En la primera etapa es necesario reparar 14 tanques (58%), en la Serie A, los TA- 106 y 108, en la Serie B los TA-101,102,103,104y105 y en la Serie C los TA-102,103,104,105,106,107,108.

En la segunda etapa están afectados 12 tanques (57%), en la Serie A los TA-114,115,116,y119, en la Serie B los TA-113,114,115,116 y en la Serie C los TA-113,114,115,116, los tres restantes de la SerieC en el momento de la inspección se encontraban en reparación

En la tercera etapa se encuentran afectados 4 tanques (19 %), en la Serie A los TA-126,128y130 y en la Serie B el TA-127.

Anexo 1.2 Continuación

La principal afectación se encuentra en las vigas del techo que soportan el mecanismo, deterioro de las tapas y en las uniones de la pared con el fondo, todo por corrosión avanzada con pérdidas considerables de espesor y provocada por el cúmulo de residuos en esas zonas, la falta de un adecuado drenaje y protección anticorrosiva.

Relacionado con las columnas, se detectó que están afectadas un total de 49, las cuales presentan un deterioro avanzado por corrosión en la base, con pérdidas de hasta un 70% del espesor. La mayor incidencia está en la primera etapa con 37 (61.6 %), 14 en la Serie A, 16 en la Serie B y 7 en la Serie C.

Las demás etapas presentan mejor estado, en la segunda etapa hay 9, 5 en la Serie A y 4 en la Serie B y en la tercera etapa solo 3, 1 en la Serie A y 2 en la Serie B.

La principal causa continúa siendo el cúmulo de residuos, así como la falta de protección anticorrosiva en esa zona.

Del examen visual practicado a las vigas que soportan los tanques se pudo apreciar que todas presentan un estado avanzado de corrosión, sobre todo en la primera etapa y que como solución alternativa se reforzó con apoyos en las columnas, lo que es necesario hacer en todos los casos, ya que por la pérdida de espesor estas se han debilitado en la unión soldada a las vigas transversales. En el caso de la Serie A, primera etapa es necesario cambiar la viga que une las columnas que soportan el TA-102 por presentar un total deterioro.

En sentido general, con excepción de la tercera etapa en la Serie C, todo el sistema de turboareadores presenta afectación por corrosión, en menor o mayor medida, lo que significa que se debe prestar atención oportunamente a los aspectos recogidos en este defectado, por lo que recomendamos lo siguiente:

- Reparar gradualmente los TA según defectado, hacer cambio de vigas y tener en cuenta el sistema de drenaje que permita la salida de agua y otros residuos que se acumulan en el techo, así como pintar las vigas y la tapas.
- Eliminar en las columnas afectadas la capa de óxido acumulada en la base hasta dejar el metal útil y luego aplicar anticorrosivo con el objetivo de atenuar el proceso de corrosión e ir reparando gradualmente según las posibilidades lo permitan
- Continuar reforzando las vigas que soportan los TK, ubicando apoyos en las columnas a ambos lados, de manera que se reduzca la carga que soportan y evitar una avería en un futuro inmediato.
- Revisar todos los arriostres del sistema y reparar según corresponda, así como eliminar los que no se estén utilizando, ya que muchos solo están supuestos.
- Revisar todo el sistema de piso, escaleras y barandas y reparar según corresponda, ya que en muchos casos han sido atacados por la corrosión, además incrementar el sistema de limpieza que es una de las causas fundamentales del deterioro.
- Revisar y reparar todo el sistema de bandejas portacables, el cual muestra un deterioro progresivo.

Inspeccionado por:

Ing: José A. Sablón Leyva
Técnico en Mto Industrial

Revisado por:

Raul Knight Pérez
Especialista Principal

Anexo

Anexo 1.3

á



EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA
GRUPO EMPRESARIAL DEL NIQUEL. MINBAS.

Carretera Moa-Baracoa km 5. CP83330. Moa. Holguín. CUBA. Pizarra: 6-8012 . Fax: 6-2240

UB MANTENIMIENTO/ Grupo Corrosión

DEFECTADO

De: Pedro Manuel Rodríguez Sablón 385
Para: Antonio Urgelles Rodriguez
Fecha: 30 de Mayo de 2006
Asunto: Informe del estado técnico de los equipos
fundamentales y estructuras de la planta de lixiviación
y Lavado.

Reporte Técnico

Los datos que se ofrecen en esta tabla se obtuvieron de la inspecciones técnicas realizadas en todos estos años a toda la instalación de la Planta Lixiv – Lavado.

Denominación	Cantidad de equipo	Estado técnico equipo y estructuras			% de la instalación buen estado	Observaciones
		B	Aceptable	Mal		
TK contacto	6	2	1	3	50	
Turbo Aireadores	66	23	31	13	34,8	
Distribuidores de pulpa y Licor	8	8	---	---	100	
Sedimentadores	20	10	4	6	50	
Tanque colectores	2	---	2	---	0	
Tanque de cola	2	1		1	50	
Torre Absorción	16	16	---	---	100	
Estructura TA	9	1	---	8	11	
Estacadas	8	2	---	6	25	
Estructura Distribuidores	8	---	6	2	0	
Estructura torre absorción	1	---	1	---	0	

Los equipos y estructuras aquí registrados, los mas críticos se encuentran entre los TA de la primera etapa incluyendo las tres series y segunda etapa serie A y C, así como todas las estructuras de sustentación de las tres etapas y las tres líneas A, B, C. Los 13 TA que aparecen en (M) hay que sustituirlos lo antes posible por el estado crítico que presentan en la pared, pueden causar averías de grandes pérdidas.

Los sedimentadores 235 SD-131B, 120C, 216A, 216B, 211B, 206B están en estado crítico fundamentalmente las paredes, los restantes están afectado; pero en un grado ligramente menor. La estructura de las estacadas que pasan entre las líneas de SD AB y BC están muy afectadas.

Las estructuras del DI- 100 y 200 A, B están en muy mal estados pero en estos momentos se reparan.

Anexo 1.3 Continuación

Los TK -01C y 02C están muy afectados por el alto nivel de agrietamiento que presentan en sus paredes.

La protección anticorrosiva en el 100% de las estructuras no existe y en el 97% de los equipos está afectada entre un 60- 80 %.

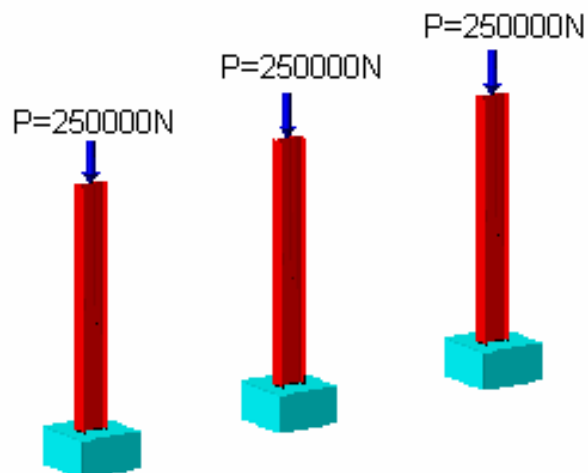
En este informe incluimos las estructuras y equipos que más problemas tienen y que en un momento determinado ó no muy lejano pueden causar grandes pérdidas en la producción.

Saludos cordiales,

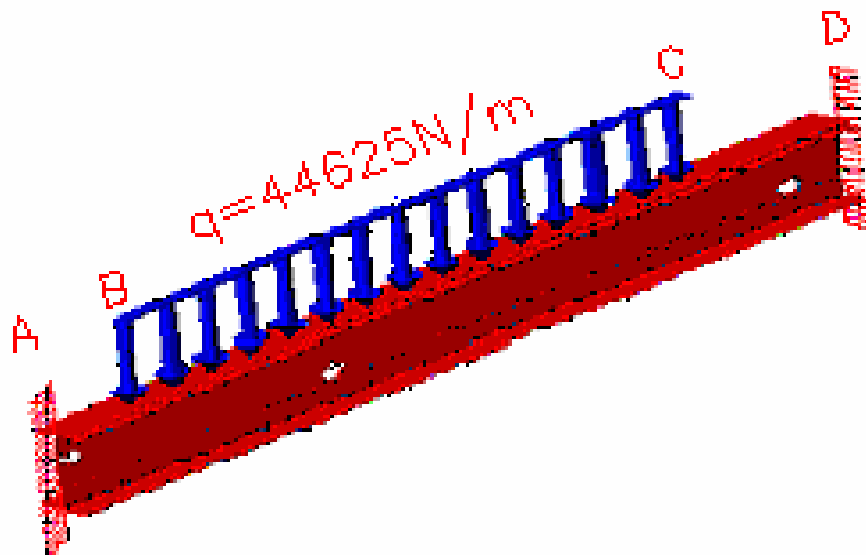
Ing Pedro Manuel Rodríguez Sablón.
Téc Corrosión

Vto Bueno Ing José Sablón Leyva
Esp Princ Corrosión

Anexo 2.1 Ubicación de cargas de pandeo



Anexo 2.2 Ubicación de cargas de Flexion



Anexo 2.3 Cinta métrica utilizada en las mediciones



Figura 2.1. Cinta métrica (flexómetro).

Anexo 2.4 Medidor ultrasónico de espesor marca KRAUTKRAMER



Figura 2.2. Medidor de espesor ultrasónico DMS-2

Anexo 2.5 Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas que se corroen (ISO 9223:1992).

Categoría	Tiempo de humectación		Ejemplo
	Horas/Año	% Año	
□ ₁	<10	<0.1	Atmósfera climatizada interior
□ ₂	10-250	0.1-3	Atmósfera interna, excepto espacios interiores no aireados
□ ₃	250-2500	3-30	Atmósfera exterior en regiones secas o muy frías
□ ₄	2500-5500	3-60	Atmósferas exteriores en todas las zonas, excepto la tropical seca y las zonas frías
□ ₅	<5500	<60	Lugares no ventilados en regiones muy húmedas

Anexo 2.6. Clasificación de la contaminación por sustancias sulfurosas representadas por el nivel de SO₂ (ISO 9223:1992).

Velocidad de depósito de SO ₂ mg/m ² día	de Concentración del SO ₂ mg/m ₃ o ppm		Categoría
<10	<0.012		P ₀
>10-35	0.012	- 0.04	P ₁
>35-80	0.04	- 0.09	P ₂
>80-200	0.09	- 0.25	P ₃

Anexo 3.1 Resultados de las mediciones de espesor en columnas y vigas

	No. de mediciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Valor mínimo
No. de columnas	Espesores actuales											
1	t	20	18,2	9	8,95	6,5	5,9	4,35	13,7	12,75	11,95	4.35
	d	6,1	16,3	10,55	9,1	9,5	8	12	6,95	14,7	14,5	6.1
2	t	5,9	6,7	14,85	13,75	12,65	5,2	4,75	18,85	19	3,7	4.75
	d	5,85	13,45	10,55	9,1	12,3	8,1	12	13,95	14,7	14,5	5.85
3	t	17	18,2	18,8	16,5	6,5	14,35	4,35	13,7	12,75	15	4.35
	d	14,95	13,45	10,65	12,95	12,3	20	19,75	13,95	18,45	14,5	10.65
4	t	19,3	19	16,55	16,35	18,95	16,75	15,95	17	12,75	15	12.75
	d	16,15	12,95	18	20	13	15,75	16,9	13,25	16,85	12,75	12.75
5	t	11,7	12,6	16,55	16,35	18,55	16,75	14,95	19	12,9	13,45	12.6
	d	15	15	18	19,5	13	14	14,6	15,25	17,2	12,1	12.1
6	t	3,75	9,15	8,65	18,8	17,25	16,75	15,95	16,2	13,9	16	3.75
	d	11,15	12,35	18	18	17	14	14,6	16	15	13,2	11.15
7	t	4,65	10,55	19	18,8	16,95	16,9	15,8	13	10	8,2	4.65
	d	10	15	10,95	18	17	14	13,8	14,4	14,35	11,2	10
8	t	4,45	11	12,2	13,4	14	15,8	13	10	8,2	9,5	4.45
	d	9,9	9,15	11,55	14,7	13,1	12,35	10,35	12,95	12,2	11,2	9.15
9	t	15,1	10	10,85	12,4	12,45	13,2	13,75	12,85	11,45	8,3	8.3
	d	11,5	12,15	12,3	14,6	18,2	19	15	14	13,95	10,8	10.8
10	t	11,55	10,2	11,65	13,4	11,85	12,35	10,55	13,9	17,8	16,5	10.2
	d	9,5	9,15	8,2	14,75	13,85	10,25	12,95	12,65	11,85	11,95	8.2
11	t	12,2	12,6	11,65	13,4	11,85	15,5	14,7	13,9	15,45	16,5	11.85
	d	9,15	10,3	13,2	10,1	13,1	12,35	12	12,95	12,2	11,2	10.1
12	t	16,43	9,92	10,26	10,08	10,87	18,6	16	10,4	13	9,95	9.92
	d	10,08	11	16,6	17,2	13	12,45	12,25	12,95	12,2	11,2	11
13	t	10	11	10,9	16,9	14,8	13,95	15,45	16,5	16	12	10
	d	10,08	11	16,6	17,2	13	12,45	12	12,95	12,2	11,2	10.08
14	t	14,2	12,25	13,5	16,9	15	15,55	14,85	14	12	12,6	12
	d	5,6	8,9	7,63	18	14,15	12,45	12	12,95	12,2	11,2	5.6
15	t	11,55	10,2	11,65	13,45	12,3	11,85	12,35	10,55	13,9	17,8	10.2
	d	9,9	9,15	11,55	14,75	13,45	12,35	12,95	12,2	11,2		9.15
16	t	14	14,1	15	13,4	11,85	12	10,55	13,25	15,6	15,1	10.55
	d	10	10	9,3	13	12,9	12,35	12,85	12,95	12,2	11,8	9.3
17	t	12	13,55	13,2	13,25	12,4	12	11,65	13,25	15,6	15,2	12
	d	9,15	11	9,5	14	13,2	12,35	12,85	12,95	14	15	9.15
18	t	10,9	10	11,95	15	16	14,5	13,5	12,95	16,2	15,1	10
	d	9,1	10,35	9,5	15	13,2	12,35	12,85	12,95	14	15	9.1
19	t	8	9	6,1	13,25	13,6	14,5	12,55	12,95	15	12,95	6.1
	d	9,1	9,1	9,5	10	8,25	4,35	16	15	14,2	13,45	4.35
20	t	3,8	8,35	6,1	13,25	13,6	14,5	12,56	13	14,5	13,2	3.8
	d	17	8,4	10	12,15	6,95	12,5	15,6	14,95	14,2	10,25	6.95

Anexo 3.2- Resultado de los análisis del polvo en suspensión

Estación Nº.	Descripción del punto de muestreo	Concentración (mg/m³)
1	Alimentadores hornos de Calcinación	1,67
2	Área de descarga de los hornos de calcinación	1,02
3	Máquina de Sinter	3,58
4	Correa Caliente	23,50
5	Secaderos TR-9	0,52
6	Hornos de Reducción Nivel 4 Losa 2	4,40
7	Romana de Hornos Losa 2 Nivel 23	2,26
8	Molinos nivel 0	1,64
9	Molinos TR-13	5,07
10	Descarga del TR-12 Tolva 2	9,62
11	Portada Principal	0,09
12	Secadero de Cobalto	0,17
13	Recuperación de NH ₃	0,08
14	Central termoeléctrica	0,05
15	3ra etapa de lixiviación	0,27

Anexo 3.3 - Valores de la concentración de los gases contaminantes

Estación Nº.	Descripción del punto de muestreo	SO₂ mg/m³	H₂S mg/m³	NO mg/m³	NO₂ mg/m³	NO_x mg/m³	NH₃ mg/m³
1	Transportador a Secadero	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02
2	Secadero de Cobalto	0,02	0,15	0,01	0,01	0,02	0,13
3	Edificio de Seguridad y Medioambiente	0,07	0,09	0,00	0,01	0,01	0,10
4	Planta de Cobalto	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,12
5	Termoeléctrica	0,04	0,02	0,00	0,12	0,12	0,22
6	Hornos de Reducción	0,03	0,11	0,00	0,00	0,00	0,06

Continuación

Estación No.	Descripción del punto de muestreo	SO ₂ mg/m ³	NO ₂ mg/m ³	Compuestos Orgánicos			NH ₃ mg/m ³
				Benceno	Tolueno	Xileno	
1	Secadero TR-9	3,43	0,00	0,08	0,016	0,01	-
2	Secadero de Cobalto	0,35	0,01	-	-	-	0.03
3	Termoeléctrica	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	-
4	Hornos de Reducción	0,03	0,00	0,01	0,002	0,01	-
5	Horno de Calcinación	0,02	0,12	0,00	0,001	0,00	-
6	Sinter	0,23	0,00	-	-	-	-
7	Planta de Cobalto	-	-	-	-	-	0,03
8	Lavado	-	-	-	-	-	0,03
9	Lixiviación	-	-	-	-	-	0,05

Mes	2003	2004	2005	2006	2007	Promedio
1	30,4	25,1	24,3	23,2	22	25
2		27	25,1	22,7	22,6	24,3
3		26,4	27,2	23,6		25,7
4		27,2	27,7	24,7		26,5
5		27,6	29	25,8		27,4
6	30,5	30,6	29,3	26,2		29,2
7	30,2	30,6	29	26,7		29,1
8	30,6	31,2	28,9	26,2		29,2
9	30,7	30	28,7			29,8
10	30,2	29,2	26,4			28,6
11	28,1	27,1	25,8	24,2		26,3
12	23,5	25,8	24,4	23,5		24,3
Total	29,275	28,15	27,15	24,7	22,3	

[illegible]

Anexo 3.6 Comportamiento de la velocidad del viento años 2003-2007

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2003	9,5					11,9	15,5	12,4	8,9	7,5	12,8	11,4
2004	10,4	10,8	15,9	12,3	14,3	12,1	10,6	11,1	9,4	8,1	13,3	11,3
2005	13,7	9,8	8,3	9,2	9,7	9,7	11,2	7,5	7,4	5,9	11,1	8,8
2006	12,6	9,7	10,1	7,9	6,4	7,1	10,5	11,3			8,2	13,3
2007	13,7	13,2										
Medias	11,98	8,7	6,86	5,88	6,08	8,16	9,56	8,46	5,14	4,3	9,08	8,96

Anexo 3.7-Tecnología de pintura

Objeto de obra: Estructuras del sistema de turboareadores. Lixiviación

Área del objeto: 4 700 m²

Área total a cubrir: 14 100 m²

Preparación de la superficie: Chorreado abrasivo hasta el metal casi banco grado Sa 2½

Cualquier modificación a esta tecnología consultar con el Cliente.

#	Operación	Material	Colores	Superficie m ²	Capas	Espesor (Micras)	Tiempo secado al tacto hrs	Relación de mezcla	Tiempo de repintado
1	Primario	Devoxy 81	Gris ral 7044	3 200	1	125	4	1:1	24
2	Intermedio Acabado	Devoxy 89	Gris ral 7047	3 200	1	125	4	1:1	24
3		Devothane 34	Gris ral 7035	3 200	1	60	4	3:1	24
4	Diluyente	Devodil 33							
5	Limpieza	Devoclean 2							

Observaciones:

Se aplicará una capa de Devoxy 81 gris como primario y otra de Devoxy 89 gris a toda la superficie. Finalmente se aplicará una tercera capa de Devothane 34 para dar a la superficie una mayor protección y mejor brillo.

Para servicio de andamios 816 m²

Nota: Los materiales de poliuretanos son sensibles a la humedad. Manténgase bien cerrados los envases antes de usarse.

La superficie (m²) anterior solo representa una serie de turbos.

Anexo 3.7- Continuación

El Devoxy 81 es un recubrimiento autoimprimante de enlaces cruzados con alto contenido de sólidos. Puede ser aplicado con pistola, brocha o rodillo. Posee excelente resistencia a superficies húmedas. Puede aplicarse a superficies con óxido firmemente adherido o superficies con recubrimientos envejecidos.

El Devoxy 89 acabado de alto contenido de sólidos por volumen. Posee muy buena resistencia al intemperismo, muy buena resistencia a la abrasión. Excelente resistencia a las superficies húmedas.

Devothane 34. Es un acabado de brillo discreto y elegante. Posee excelente resistencia a derrames y salpicaduras de ácidos, álcalis y la mayoría de solventes. También resiste bien los derrames de agua y sales.

Es un excelente recubrimiento para usarse en plantas de proceso químico y demás industrias de demanda similar.

Medidas de seguridad y salud

Seguir las indicaciones de la etiqueta y de la hoja de características técnicas.

Utilizar ropas de trabajo adecuadas.

Evitar contacto directo con la pintura y los disolventes.

Usar gafas de seguridad y mascarillas con filtro cuando se pinta a pistola y también cuando se raspan o cepillan superficies.

Observar estricta higiene personal.

No comer o beber mientras se este pintando.

Mantenga alejada cualquier fuente de llama o chispa.

Anexo 3.8 -Miniserie de C, primera etapa de lixiviación reparada y pintada.



Miniserie C de turboareadores de la Planta de Lixiviación