



INSTITUTO SUPERIOR  
MINERO METALÚRGICO DE MOA  
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

*Rediseño de un tramo de estacada aérea  
de la Empresa Mecánica del Níquel  
“Comandante Gustavo Machín Hoed de Beché”*

**Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico**

**Autor: Over Luis Cantillo Goliat**

**Tutor: Prof. Asist., Ing. Elis Efraín Guzmán Romero, Ms. C.**

**Moa**

**2017-2018**

**“Año 60 de la Revolución”**



FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico

**TÍTULO:** Rediseño de un tramo de estacada aérea de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beché”.

**Autor:** Over Luis Cantillo Goliat

**Tutor:** Prof. Asist., Ing. Elis Efraín Guzmán Romero, Ms. C.

Moa 2018

“Año 60 de la Revolución”

## ***DECLARACIÓN DE AUTORIDAD***

*Yo Over Luis Cantillo Goliat autor de este trabajo de Diploma y el tutor Master en Ciencias Elis Efraín Guzmán Romero declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.*

---

*Over Luis Cantillo Goliat*

---

*Ms. C. Elis Efraín Guzmán Romero*

## ***PENSAMIENTO***

*La revolución no se lleva en la boca para vivir de ella, se lleva en el corazón para morir por ella.*

*Ernesto “Che” Guevara*



## **DEDICATORIA**

*Este trabajo va dedicado especialmente a mi esposa Danay de la Caridad Rubio Caballero y a mi hijo Luis Daniel Cantillo Rubio por haber estado a mi lado apoyándome cuando más los necesité, a mi mamá Idoris Reyna Goliat Lores por haberme apoyado en toda mi etapa de estudiante, a mi abuelo Alcibiades Goliat López y a mi tío Alcibiades Goliat Lores por asumir el papel de padres míos en los últimos años, a mis hermanos Luis Mauro Cantillo Goliat y Víctor Adriel Cantillo Goliat por animarme en tantos momentos difíciles que he vivido en estos últimos años, a mi papá Over Luis Cantillo Sánchez por inculcarme la dedicación para poder salir adelante día a día.*

## ***AGRADECIMIENTOS***

*Agradezco a Fidel y a la Revolución cubana por haberme dado la posibilidad de estudiar una carrera universitaria de manera gratuita, a mi tutor y mi oponente por dedicarme gran parte de su tiempo para que este trabajo tuviera la calidad necesaria, a todos los profesores y compañeros de clases de estos últimos años. A todos los trabajadores del departamento de ingeniería del combinado mecánico. A mi madre, esposa, hijo, abuelo, tío, hermanos, padre, suegros, cuñada y sobrinas.*

*“¡¡¡Muchas gracias!!!”*



## RESUMEN

En el presente trabajo se propone un rediseño a un tramo de las estacadas aéreas perteneciente a la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beché”. Se realiza un análisis de la resistencia mecánica atendiendo a los parámetros actuales de trabajo, se comprueban las influencias de las cargas de vientos y se aplica un método para evitar la corrosión de las mismas. El análisis de pandeo de las estructuras indican que se garantiza la máxima resistencia con las cargas de trabajo actuales a las que están sometidas, dando un valor de tensión máxima de 52,995 MPa que está muy por debajo del valor máximo permisible del material que es de 120 MPa. La simulación por el MEF comprobó que las estructuras soportan las cargas de viento a las que están sometidas dando valores de factor de seguridad de 1,78 para condiciones normales y de 1,3 para vientos de ciclones de hasta categoría 5. Se propone una estrategia para el incremento de la resistencia a la corrosión con el empleo de recubrimientos de pintura. Este nuevo diseño logra eliminar 60 m<sup>2</sup> de estructuras metálicas por cada tramo, ahorrando así un total de 140,000.00 CUC a la empresa que pueden ser destinados a la perfección de su línea de producción.



## **ABSTRACT**

In the present work aims to the redesign of the proposed section of the pipe racks which belong to the Nickel Mechanical Factory "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beché". An analysis of the mechanical resistance is carried out according to the current work parameters, the influences of the wind loads are checked and a method is applied to avoid the corrosion of the pipe racks. The buckling analysis of the structures indicates that the maximum resistance is guaranteed with the current workloads to which they are subjected, giving a maximum tension value of 52,995 MPa that is well below the maximum allowable value of the material, which is 120 MPa. The simulation by the FEM verified that the structures support the wind loads to which they are subjected, giving values of safety factor of 1,78 for normal conditions and 1,3 for winds of cyclones up to category 5. A strategy is proposed for the increase of the resistance to corrosion with the use of paint coatings. This new design manages to eliminate 60 m<sup>2</sup> of metallic structures for each section, thus saving a total of 140,000.00 CUC to the company that can be addressed to the perfection of its production line.



INDICE	Páginas
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	5
1.1. Introducción al capítulo .....	5
1.2. Estacadas aéreas.....	5
1.2.1. Destinación de una estacada aérea .....	5
1.2.2. Algunas especificaciones de las estacadas aéreas.....	6
1.3. Características de los aceros de construcción .....	6
1.4. Resistencia mecánica en estructuras metálicas.....	7
1.4.1. Análisis de estabilidad en estructuras metálicas.....	7
1.5. Modelación por el método de elementos finitos .....	8
1.5.1. Simulación numérica .....	8
1.5.2. Situaciones de no linealidad presentes en problemas reales .....	9
1.5.3. Análisis no lineal por la geometría .....	10
1.6. Proceso de Corrosión Atmosférica.....	10
1.6.1. Factores que favorecen los procesos de corrosión atmosférica.....	11
1.6.2. Influencia de las condiciones meteorológicas en la corrosión .....	12
1.6.3. Contaminación Atmosférica .....	12
1.6.4. Principales contaminantes que inciden en la velocidad de corrosión ....	12
1.6.5. Calibración de la Atmósfera.....	14
1.6.6. Los contaminantes atmosféricos .....	16
1.6.7. Método de control de la corrosión atmosférica .....	16
1.7. Protección de estructuras dañadas por la corrosión atmosférica .....	17
1.7.1. La protección de estructuras metálicas con pinturas.....	19
1.7.2. La pintura y su composición básica .....	19
1.7.3. Tipos de pinturas. ....	20
1.7.4. Standard de preparación de superficies .....	20
1.7.5. Aplicación de recubrimientos anticorrosivos.....	21
1.7.6. Método de aplicación de recubrimientos anticorrosivos .....	21
1.8. Carga de viento. Método de cálculo .....	21
1.8.1. Referencias normativas .....	22
1.9. Concepto y objetivos del mantenimiento industrial .....	22



1.9.1. Misión del mantenimiento .....	23
1.9.2. Valores básicos del mantenimiento .....	23
1.9.3. Mantenimiento mecánico .....	24
1.9.4. Los sistemas de mantenimiento .....	25
1.9.5. Tipos de mantenimiento .....	26
1.10. Conclusiones del capítulo .....	27
<b>CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
2.1. Introducción al capítulo .....	28
2.2. Determinación de la carga total de la estructura .....	28
2.3. Determinación de las reacciones en los apoyos y los momentos flectores..	29
2.4. Determinación de la resistencia mecánica de estructuras metálicas .....	30
2.4.1. Determinación de la resistencia a la estabilidad por compresión .....	30
2.4.2. Determinación de la carga crítica .....	31
2.4.3. Determinación de la tensión crítica .....	32
2.4.4. Obtención de la condición de estabilidad .....	32
2.4.5. Solicitación de Flexión .....	34
2.5. Aplicación de la modelación por el M.E.F en estructuras metálicas.....	34
2.5.1. Pasos para el modelado por el M.E.F en las estructuras metálicas .....	34
2.5.2. Condiciones de contorno estructurales.....	35
2.5.3. Aplicación de solicitaciones y condiciones de contorno.....	35
2.5.4. Determinación de los espesores de los perfiles metálicos .....	36
2.6. Metodología para la protección anticorrosiva.....	36
2.6.1. Preparación y limpieza de las superficies de aceros .....	36
2.6.2. Chorreado abrasivo .....	37
2.6.3. Recubrimiento.....	38
2.6.4. Aplicación del sistema epoxy – poliuretano .....	38
2.7. Conclusiones del capítulo .....	39
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
3.1. Introducción al capítulo .....	40
3.2. Cálculo de la carga total de la estructura .....	40
3.3. Cálculo de las reacciones en los apoyos y los momentos flectores.....	40
3.4. Cálculo de la resistencia mecánica de estructuras metálicas .....	42
3.4.1. Cálculo de la resistencia a la estabilidad por compresión .....	42



3.4.2. Cálculo de la carga crítica .....	42
3.4.3. Cálculo de la tensión crítica .....	42
3.4.4. Análisis de la condición de estabilidad .....	42
3.4.5. Análisis de las vigas sometidas a flexión .....	43
3.5. Resultados de la modelación por el método de elementos finitos.....	43
3.5.1. Resultado para condiciones normales .....	44
3.5.2. Resultado para ciclones de alta categoría .....	47
3.6. Aplicación de un sistema de mantenimiento para la conservación .....	50
3.7. Valoración económica .....	50
3.8. Impacto ambiental .....	50
3.9. Conclusiones del capítulo .....	51
CONCLUSIONES GENERALES.....	52
RECOMENDACIONES .....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	54
ANEXOS .....	56



## INTRODUCCIÓN

La región de Moa, situada en el nordeste de la República de Cuba, bañada por las aguas del Océano Atlántico, constituye desde el punto de vista económico un área de marcado interés por la presencia de uno de los mayores yacimientos de níquel del mundo, representando un elemento esencial que funciona como fuente del desarrollo socioeconómico en esta parte del territorio nacional.

En la época actual que el mundo está viviendo, el desarrollo de todo tipo de industria es de vital importancia para el crecimiento económico de cada país. Para ello, se llevan a cabo una serie de inversiones y continuas investigaciones. Cuba no está exento de lo antes dicho, pues diariamente se realizan investigaciones e innovaciones para así alcanzar el perfeccionamiento que impulse nuestra economía. Específicamente en nuestro municipio, existen varias industrias destinadas a la producción de níquel, para que estas puedan cumplir eficientemente con su plan de producción mensual y anual, sus maquinarias requieren de constantes reparaciones y aquí es donde entra la Empresa Mecánica del Níquel “Gustavo Machín Hoed de Beché”.

En esta empresa se llevan a cabo trabajos destinados al perfeccionamiento empresarial para lo cual sería mucho más productivo si estos elementos de calidad van acompañados de una tecnología avanzada en cuanto a máquinas herramientas se refiere.

Desde la década del sesenta, con el inicio del proceso revolucionario hasta la actualidad, el incremento de la actividad económica ha alcanzado resultados impresionantes con el aumento de inversiones en nuevas plantas y la modernización de otras que datan de la época del cuarenta por parte de la Industria Cubana del Níquel y el MINBAS, lo que unido últimamente a la implementación del Perfeccionamiento Empresarial en las empresas, ha ocasionado un efecto multiplicador que ha dinamizado la económica.

El costo de producción del Níquel está incrementando en gran medida por el elevado



consumo energético, debido a que una parte significativa del equipamiento utilizado se encuentra en fase de deterioro progresivo, exigiendo grandes esfuerzos para sustituir o recuperar los dispositivos, agregados y piezas que conforman los componentes principales del equipamiento.

La eficiencia y confiabilidad son características buscadas incansablemente por la ciencia e ingeniería. Esto conlleva al desarrollo de nuevas tecnologías las cuales ponen al servicio de la industria en general, soluciones que aumentan las prestaciones de los componentes mecánicos involucrados.

La situación económica actual en nuestro país se relaciona con los cambios experimentados en la sociedad, así como las relaciones entre plan y mercado. Un papel importante ha jugado también el perfeccionamiento empresarial, siendo uno de los factores que más ha de llevar al desarrollo futuro del país. Los adelantos tecnológicos producidos en los últimos años han motivado el incremento de la importancia que se le concede al estudio del proceso de fabricación de los productos y como elemento indispensable para el aseguramiento de la cantidad y calidad de la producción, donde se deben utilizar coordinadamente los hombres, equipos, materiales, energía e información en conjunto con el medio ambiente.

Debido a la creciente competencia en el mercado mundial, las empresas cubanas se ven obligadas a incrementar la calidad y a realizar un amplio estudio en la preparación, ejecución y venta de la producción, con el objetivo de aprovechar al máximo cada proceso, elaborando productos que sean capaces de competir al más alto nivel en un mercado cada vez más globalizado.

La producción de níquel es fundamental para el desarrollo de la economía cubana, ya que su precio cobra gran auge en el mercado internacional, constituyendo la primera fuente de exportación del país y se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología y con ello equipos y aparatos para su desarrollo.

### **Situación problemática:**

En la Empresa Mecánica del Níquel se emplean las estacadas aéreas con el objetivo de llevar la red eléctrica y distintos tipos de tuberías a toda la empresa. Estas inicialmente constaban de numerosos elementos los cuales que con el paso de los años fueron disminuyendo, dando lugar a un sobredimensionamiento de dicha estructura, puesto que la carga que estas soportan está por debajo de la carga de diseño, provocando un gasto innecesario por términos de mantenimiento, gastos que pudieran emplearse en el perfeccionamiento de otras áreas de la empresa para mejorar su flujo productivo y así hacer un mayor aporte a la economía del país.

### **Problema:**

Necesidad de rediseñar las estacadas aéreas de la Empresa Mecánica del Níquel para la disminución de los gastos de mantenimiento.

### **Objeto de estudio:**

Las estacadas aéreas de la Empresa Mecánica del Níquel.

### **Objetivo general:**

Rediseñar un tramo de 18 m de las estacadas aéreas de la Empresa Mecánica del Níquel atendiendo a los parámetros actuales de trabajo para disminuir los costos de mantenimiento de la empresa.

### **Objetivos específicos:**

1. Definir la metodología de cálculo para determinar la resistencia mecánica de la propuesta de diseño de las estacadas aéreas para las cargas actuales a las que están sometidas.
2. Comprobar las influencias de las cargas vientos en la propuesta de diseño de las estacadas aéreas.
3. Aplicar un método para mantener las estructuras evitando la corrosión por la presencia de una atmósfera corrosiva.

### **Campo de acción:**



Análisis de la estructura que conforman las estacadas aéreas de la Empresa Mecánica del Níquel.

### **Hipótesis:**

Si se aplica correctamente una metodología de cálculo teniendo en cuenta los parámetros actuales de trabajo de las estacadas aéreas, como son las cargas por elementos que soportan y las cargas de viento a las que están expuesta, entonces, se podrá realizar un diseño más racional de las mismas, que permita la disminución de los gastos de mantenimiento y conservación de las mismas.

### **Tareas del trabajo:**

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con las estacadas aéreas.
2. Propuesta de diseño de un tramo de estacada aérea.
3. Determinación de la resistencia mecánica de la estacada aérea.
4. Determinación de las cargas de trabajo y el viento que influyen en el diseño de la estacada.
5. Comprobación de la resistencia mecánica mediante el Método de Elementos Finitos aplicando la metodología de la norma NC 285:2003 "Carga de viento. Método de Cálculo".
6. Establecimiento del ciclo de mantenimiento y conservación para la propuesta.
7. Evaluación de los efectos económicos y ambientales.

## **CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

### **1.1. Introducción al capítulo**

Elaborar el marco teórico de una investigación es de vital importancia, 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 las estacadas aéreas, así como la influencia que ejercen las cargas de viento y la atmósfera altamente contaminada en el comportamiento de las propiedades mecánicas de estas estructuras.

### **1.2. Estacadas aéreas**

Las estacadas aéreas son estructuras diseñadas y construidas específicamente para soportar tuberías múltiples donde la estructura adecuada no está disponible. Típicamente soportan tuberías, cables de alimentación y bandejas de cables para instrumentos en plantas petroquímicas, químicas y de energía. Ocasionalmente pueden soportar equipos mecánicos, embarcaciones y plataformas de acceso a válvulas (Werner Sölken, 2008).

Las estacadas aéreas son estructuras en plantas petroquímicas, químicas y de energía que soportan tuberías, cables de alimentación y bandejas de cables para instrumentos. Ocasionalmente, también pueden soportar equipos mecánicos, embarcaciones y plataformas de acceso a válvulas (Drake & Walter, 2010).

#### **1.2.1. Destinación de una estacada aérea**

Las estacadas aéreas son necesarias para organizar el proceso y dar servicio a las tuberías en toda la planta o fábrica. Una gran cantidad de tuberías de proceso, líneas de bengalas y líneas de colector que pasan por estos de un equipo a otro, o de una unidad a otra (Werner Sölken, 2008).





También se adjunta tubería, que conduce al grupo de utilidad, como agua, vapor, condensado, aire de trabajo, aire de instrumentación y nitrógeno. Los cables de alimentación eléctrica soportados por conductos de cables también se colocan en el bastidor de tubos, pero separados de los conductos.

### **1.2.2. Algunas especificaciones de las estacadas aéreas**

Todas las estacadas aéreas deberían contar con la siguientes especificaciones (Werner Sölken, 2008).

- La seguridad: en todas las situaciones las rutas de escape deben estar presentes.
- Altura mínima de la cabeza: entre pasarelas y racks para tubos siempre debe haber un espacio libre para poder caminar de manera natural.
- Debería haber una opción: para dar acceso a grúas y transporte pesado a los equipos. Para dar a las personas acceso a equipos, instrumentación y equipos de extinción de incendios. Para dar acceso a operadores de planta y trabajadores de mantenimiento.
- Escaleras y plataformas: las escaleras y plataformas están estandarizadas para un proyecto. Cada etapa o paso debe ser la misma distancia. Las plataformas siempre deben tener un ancho mínimo.

### **1.3. 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- 49kgf/mm<sup>2</sup>) y una resistencia a la rotura de 490-588 MPa (50- 60 kgf/mm<sup>2</sup>).



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 (Sablón, 2008).

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.

### **1.4. Resistencia mecánica en estructuras metálicas**

Las estructuras metálicas (Fernández, 1988) empleadas como soportes de equipos y recipientes están sometidas a dos solicitaciones fundamentales a saber:

- Pandeo
- Flexión

La sollicitación de pandeo se produce fundamentalmente por las cargas tecnológicas que actúan sobre las estructuras (columnas), estas generalmente son asociadas 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 relaciona con cargas o esfuerzos de tracción (Sablón, 2008).

#### **1.4.1. Análisis de estabilidad en estructuras metálicas**

Para analizar la estabilidad es necesario escoger la metodología de cálculo clásica (Fernández, 1988), 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 forma sutiles, razón por la que 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 (Sablón, 2008).

### **1.5. Modelación por el método de elementos finitos**

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la que es utilizada para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más 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 más complicado (Sablón, 2008).

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

#### **1.5.1. Simulación numérica**

Las empresas de países desarrollados (Sablón, 2008) 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 más 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 (Sablón, 2008).

El método de los elementos finitos (Hutton, Hullman, 2004) es una de las más importantes técnicas de simulación y seguramente la más utilizada en las aplicaciones industriales.

Según (Sablón, 2008), 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.

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 (Sablón, 2008).

### **1.5.2. 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 soportará 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 (Sablón, 2008).

Las estructuras (figura 1.1) experimentan un comportamiento no lineal por la geometría.

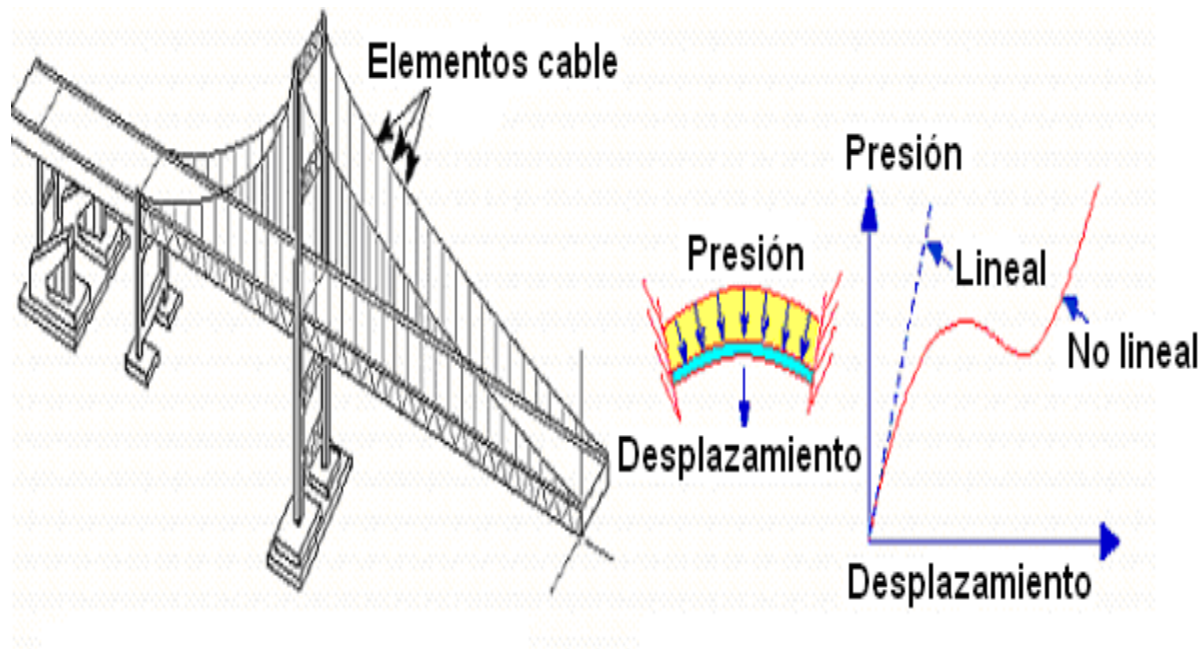


Figura 1.1. Ejemplo de no linealidad por la geometría en puentes.

### 1.5.3. 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. 1.1) 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 pando (Sablón, 2008).

## 1.6. 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:**

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

**1.6.1. 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 mencionar 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.

### **1.6.2. 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.

### **1.6.3. Contaminación Atmosférica**

Se puede definir la contaminación atmosférica (Biswas, Geping, 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  $\text{mg/m}^3$ ) o en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g/m}^3$ ). Cada contaminante tiene un tiempo específico de exposición.

### **1.6.4. Principales contaminantes que inciden en la velocidad de corrosión**

El cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) según (Berman, 1982) son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera, también es importante



mentar al sulfuro de hidrógeno ( $\text{HSO}_3$ ), 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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$ , 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 de 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 sí (sistemas dúplex), inhibidores y protección electroquímica. 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 que se tiene muy en cuenta en el momento de diseñar la protección anticorrosiva.

### **1.6.5. Calibración de la Atmósfera**

Para poder determinar la corrosividad de una atmósfera es necesario relacionar entre sí todos los factores que la afectan, y 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 los aires, tanto naturales como producidos 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, entre otros.

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  $\text{SO}_2$  y  $\text{NaCl}$ .

#### **1.6.6. 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.

#### **1.6.7. Método de control de la corrosión atmosférica**

Por lo dicho hasta el momento por (Ailor, 1986) y (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  $\text{SO}_2$ . 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.

### **1.7. Protección de estructuras dañadas por la corrosión atmosférica**

Se 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 (Sablón, 2008).

En el trabajo de (Sablón, 2008) se 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.

En el trabajo de (Strebkov, 2005) se 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. En su trabajo (Muñoz, 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,  $\text{SO}_2$  y el ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) según norma (ISO 1989), sin embargo los valores obtenidos a través de las estaciones de monitoreo 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  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NaCl}$  son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera. El  $\text{NaCl}$  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  $\text{SO}_2$ , proveniente del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre.

### **1.7.1. La protección de estructuras metálicas con pinturas**

El método más 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 más severas que puedan presentarse.

### **1.7.2. 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.

### 1.7.3. Tipos de pinturas.

Atendiendo a la forma de secado se distinguen cuatro grandes grupos de pinturas (tabla 1.1), las que a su vez pueden combinarse entre sí, según las características de los procesos y de elementos a recubrir.

Tabla 1.1. 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)

**Fuente:** (Sablón, 2008)

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 proporcionará un óptimo resultado si la superficie sobre la que se ha aplicado no está adecuadamente preparada.

### 1.7.4. Standard de preparación de superficies

Las normas más comúnmente utilizadas en Europa son las editadas por el Instituto Sueco de la Corrosión bajo el título “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 máquina, esmerilado a máquina, etc. Y finalmente distingue las superficies para cuatro grados diferentes de preparación (Sa1, Sa2, Sa2 ½ y Sa3) mediante chorro abrasivo (arena y granalla).

#### **1.7.5. Aplicación de recubrimientos anticorrosivos**

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

- Estado de la superficie metálica
- Temperatura.
- 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.

#### **1.7.6. 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 más lisa posible y perfectamente limpia, dejándola secar convenientemente

#### **1.8. Carga de viento. Método de cálculo**

Esta norma cubana establece el método de cálculo para determinar la carga de viento que debe utilizarse en los cálculos estáticos y dinámicos de los edificios y obras de ingeniería, o de sus partes y elementos, para los cuales el viento resulta ser una sobrecarga de uso (NC 285:2003).





### **1.8.1. Referencias normativas**

La siguiente norma contiene disposiciones que, al ser citadas en este texto, constituyen disposiciones de esta norma cubana. La edición indicada estaba en vigencia en el momento de esta publicación. Como toda norma está sujeta a revisión, se recomienda aquellos que se relacionen, acuerdos sobre la base de ella, que analicen la conveniencia de usar la edición más reciente de la norma (NC 285:2003).

### **1.9. Concepto y objetivos del mantenimiento industrial**

El mantenimiento se puede definir como el control constante de las instalaciones (en el caso de una planta) o de los componentes (en el caso de un producto), así como el conjunto de trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de un sistema en general (Muñoz, 2004).

Por lo tanto, las tareas de mantenimiento se aplican sobre las instalaciones fijas y móviles, sobre equipos y maquinarias, sobre edificios industriales, comerciales o de servicios específicos, sobre las mejoras introducidas al terreno y sobre cualquier otro tipo de bien productivo.

El objetivo final del mantenimiento industrial se puede sintetizar en los siguientes puntos:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, las fallas sobre los bienes
- Disminuir la gravedad de las fallas que no se lleguen a evitar
- Evitar detenciones inútiles o paros de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Reducir costos.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.



En resumen, un mantenimiento adecuado, tiende a prolongar la vida útil de los bienes, a obtener un rendimiento aceptable de los mismos durante más tiempo y a reducir el número de fallos.

### **1.9.1. Misión del mantenimiento**

Según (García, 2011) el mantenimiento industrial como parte integral de la producción, tiene como propósito garantizar el óptimo funcionamiento de los equipos, y demás infraestructura empresarial, mediante programas de prevención y predicción de fallas, reparación de daños y mejoramiento continuo de sus condiciones operativas con la política de cero defectos, para cumplir sus cuatro objetivos fundamentales:

- Conservación de los activos físicos. Mediante desarrollo de las técnicas administrativas y de mantenimiento más eficaces, para conservar en el largo plazo la vida útil de los equipos productivos, acordes con los requerimientos económicos.
- Disponibilidad de los activos físicos. Mediante el desarrollo de normas y procedimientos que promuevan de manera eficiente, segura y económica la máxima disponibilidad técnica y operativa de los equipos de acuerdo con los requisitos de producción.
- Administración eficaz de los recursos. Mediante la mejora de los procesos, procedimientos y estándares que mejor promuevan el uso eficiente, eficaz y económico de todos los recursos tangibles e intangibles de la organización.
- Desarrollo del talento humano. Por medio de programas de formación y capacitación permanente, sistemas de competencias, gerencia del desempeño y gestión global del conocimiento.

### **1.9.2. Valores básicos del mantenimiento**

Según (García, 2011) la cultura corporativa es el sistema de valores y creencias compartidas de una compañía; la gente, la estructura organizacional, los procesos de toma de decisiones y los sistemas de gestión interactúan para producir normas de

comportamiento. Los principales valores de que se incluyen dentro de la filosofía del mantenimiento son:

- Lealtad
- Respeto
- Confianza
- Tolerancia
- Austeridad
- Honestidad
- Cooperación
- Responsabilidad
- Vocación de servicio
- Sentido de pertenencia

Hoy en día, en la mayoría de los procesos industriales se hace necesario un mantenimiento organizado, seguro efectivo y económico, que avale la disponibilidad de los activos físicos. La gestión de los activos es un reto al futuro, donde el objetivo es transmitir los valores del mantenimiento. La clave del éxito será la consolidación de la cultura interna, y el trabajo en equipo del personal, que se mide por el cuidado y el compromiso puesto en los anteriores valores y sus logros. Esto se ve reflejado en la actitud, la conducta y el cuidado de los activos, así como en la forma de respetar las reglas y los procedimientos, lo cual no es otra cosa que hacer buen mantenimiento en el mejor sentido de la palabra (Gonzáles, 2016).

### **1.9.3. Mantenimiento mecánico**

Es una actividad técnica relacionada con la conservación y buen funcionamiento de todo equipo, mecanismo o maquinaria, para que trabaje con eficiencia y funcione el mayor tiempo posible sin interrupciones ni inconvenientes (Gonzáles, 2016).

Un mantenimiento apropiado asegura un tiempo máximo de operaciones óptimas y ayuda a reducir, el número de fallas del equipo o máquina a un costo mínimo y en condiciones de seguridad para el personal de operaciones y mantenimiento.

#### **1.9.4. Los sistemas de mantenimiento**

Un Sistema de Mantenimiento es un conjunto de funciones que están orientadas a brindar el mayor soporte a la gestión de mantenimiento y lograr así los objetivos de una alta disponibilidad. (APREMAT, 2000).

Lo que busca el Sistema de Mantenimiento en general es incrementar al máximo la disponibilidad de los recursos. Entendiendo por disponibilidad que el equipo se encuentre en buen estado de funcionamiento la mayor parte del tiempo, cumpliendo así los propósitos para lo cual fue diseñado.

Las ventajas que proporciona un Sistema de Mantenimiento son: mayor disponibilidad, incrementar la vida útil de los recursos, reducir costos de reparaciones, reducir tiempos muertos, aumentar confiabilidad, mejorar condiciones de operación y trabajo, propiciar un mejor ambiente laboral y enseñar con calidad.

En mantenimiento, su organización, planificación e información, deben estar encaminados a la consecución de varios objetivos; al respecto (Sablón, 2008). En su estudio cita lo siguiente:

- Optimización de la disponibilidad del equipo productivo.
- Disminución de los costos de mantenimiento.
- Optimización de los recursos humanos.
- Maximización de la vida de la máquina.
- Evitar, reducir, y en su caso, reparar las fallas sobre los bienes precitados.
- Disminuir la gravedad de las fallas que no se lleguen a evitar.
- Evitar detenciones inútiles o parada de máquina.
- Evitar accidentes.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Alcanzar a prolongar la vida útil de los bienes.

El mantenimiento encierra todo lo referido a la organización, aplicación y ejecución de toda actividad que brinde, mejore y conserve el funcionamiento de una máquina.

### **1.9.5. Tipos de mantenimiento**

Actualmente existen variados sistemas para acometer el servicio de mantenimiento de las instalaciones en operación. Algunos de ellos no solamente centran su atención en la tarea de corregir los fallos, sino que también tratan de actuar antes de la aparición de los mismos haciéndolo tanto sobre los bienes, tal como fueron concebidos, como sobre los que se encuentran en etapa de diseño, introduciendo en estos últimos, las modalidades de simplicidad en el diseño (Gonzáles, 2016).

Los tipos de mantenimiento que se van a estudiar son los siguientes:

- Mantenimiento correctivo
  - ✓ Mantenimiento correctivo no planificado
  - ✓ Mantenimiento correctivo planificado
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo
- Mantenimiento programado
- Mantenimiento productivo total (TPM).



### **1.10. Conclusiones del capítulo**

- El análisis bibliográfico referido al fenómeno de la corrosión posibilitó profundizar en los elementos teóricos para investigar la influencia de los agentes contaminantes del proceso tecnológico en la atmósfera, así como su influencia en las estructuras metálicas.
- Se argumentan las teorías relacionadas con el comportamiento de la resistencia mecánica de las estructuras metálicas sometidas a medios agresivos.
- Mediante el análisis se ejerce una correcta selección de uno de los métodos y procedimientos para la protección anticorrosiva.

## 2.1. Introducción al capítulo

## Objetivo del capítulo

## 2.2. Determinación de la carga total de la estructura

[illegible]

$$q_{est.} = \sum_{i=1}^n c \cdot l \cdot w \quad (2.1.1)$$

$$q_{ele.} = \sum_{i=1}^n l \cdot w + \sum_{i=1}^n V \cdot w_l \quad (2.1.2)$$

$$q_{viento} = A \cdot q \quad (2.1.3)$$

$q_t$ .- carga total, (N)

$q_{est.}$ .- carga por estructura, (N)

$q_{ele.}$ .- carga por elementos, (N)

$q_{viento}$ .- carga de viento, (N)

$c$ .- cantidad de vigas

$l$ .- longitud de las vigas y las tuberías, (m)

$w$ .- peso por metro lineal de las vigas y las tuberías, (kg/m)

$V$ .- volumen de la tubería, (m<sup>3</sup>)

$w_l$ .- peso del líquido por unidad de metro lineal, (kg/m)

$A$ .- área de las cerchas expuestas a los vientos, (m<sup>2</sup>)

$q$ .- presión básica del viento sobre una superficie, (kN/m<sup>2</sup>)

### 2.3. Determinación de las reacciones en los apoyos y los momentos flectores

Para el cálculo de las reacciones en los apoyos de cada tramo de las estacadas se emplea el software MD Solid 3.4.

Esto también puede determinarse empleando la ecuación planteada por (Beer et al., 2010), la cual plantea que:

$$M = F \cdot r$$

Sustituyendo:

$$\Sigma M = q_t \cdot 9 + R_B \cdot 18 = 0$$

Despejando tenemos que:  $R_B = \frac{q_t}{2}$  y  $R_A = \frac{q_t}{2}$

Donde:

$M$ .- momento, (N/m)

$F$ .- fuerza, (N)

$r$ .- distancia, (m)

$R_A$  y  $R_B$ .- reacción en el primer y el segundo apoyo respectivamente, (N)



## 2.4. 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 como en flexión (Sablón, 2008).

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

- Pandeo por compresión (flexión longitudinal)
- Flexión

### 2.4.1. Determinación de la resistencia a la estabilidad por compresión

El pandeo o fenómeno de la pérdida de estabilidad se analizará en las columnas 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 estacadas, en éste intervienen:

- tuberías de agua.
- línea de cables de alimentación.

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 (Feodosiev, 1985). Se designa como “ $\lambda$ ”, se denomina esbeltez de la columna y se determina:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i} \quad (2.2)$$

Siendo:

$\mu$ .- coeficiente de reducción de la longitud.

$l$ .- longitud de la barra; (m).

$i$ .- radio de giro de la sección expresada por:

$$i^2 = \frac{I_{min}}{F}; (cm) \quad (2.2.1)$$

Donde:

$I_{min}$ .- momento de inercia mínimo de la sección, ( $cm^4$ )

$F$ .- área de la sección transversal; ( $cm^2$ ).

La tensión crítica crece en la medida que disminuye la esbeltez, dicha esbeltez límite propuesta por Euler (Feodosiev, 1985) se determina:

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

Conociendo que:

$\lambda$  y  $\lambda_{lim}$ .-son adimensionales.

$\lambda$ .- depende de las características geométricas de la columna.

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

$E$ .- módulo de elasticidad del material; (MPa).

$\sigma_P$ .- tensión límite de proporcionalidad; (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.

#### 2.4.2. Determinación 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 (Sablón, 2008).

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot l)^2} \quad (2.4)$$

Donde:

$P_{crit}$ .- carga crítica, (N)

### 2.4.3. 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):

$$\sigma_{crit} = \frac{P_{crit}}{F} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot i^2}{(\mu \cdot l)^2}; (kgf/cm^2). \quad (2.5)$$

Con:

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

$$[P_{crit}] = \frac{P_{crit}}{n_e}; (N) \quad (2.5.1)$$

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, 1988) para los aceros  $n_e = (1,8 - 3)$ .

### 2.4.4. 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 (Sablón, 2008):

$$\sigma_{máx} = \frac{P_{crit}}{n_e \cdot F} \leq [\sigma]_{crit} \quad (2.6)$$

Para lo que:

$$[\sigma]_{crit} = \varphi [\sigma]_c \quad (2.6.1)$$

$\varphi$ .- coeficiente de reducción de la tensión admisible (o coeficiente de pandeo), este depende de la esbeltez y de las propiedades mecánicas del material.

- Condición de resistencia:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{crit}}{n \cdot F} \leq [\sigma]_c \quad (2.7)$$

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \quad (2.7.1)$$

$n$ .- coeficiente de seguridad

$n_1$ .- es el coeficiente que considera el error posible al determinar las cargas y las tensiones.  $n_1 = 1,2$  (considerando que las tensiones se obtienen con una exactitud mínima).

$n_2$ .- es el coeficiente que tiene en cuenta la heterogeneidad del material,  $n_2$  varía con respecto a la relación  $\frac{\sigma_{fl}}{\sigma_r}$ .

$n_3$ .- es el coeficiente de las condiciones de trabajo que tiene en cuenta el grado de responsabilidad del elemento.  $n_3 = 1,3$  (considerando un grado medio de responsabilidad del material).

$\sigma_{m\acute{a}x}$ .- tensión máxima; (MPa).

$[\sigma_e]$ .- tensión admisible a la estabilidad; (MPa).

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

$\sigma_{crit}$ .- tensión crítica; (MPa).

$P_{crit}$ .- carga crítica; (N).

$\sigma_{fl}$ .- tensión límite de fluencia; (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.

#### 2.4.5. Solicitación de Flexión

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

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{fm\acute{a}x}}{\omega_x} \leq [\sigma]_c \quad (2.8)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ .- tensión máxima; (MPa).

$M_{fm\acute{a}x}$ .- momento flector máximo; (Nm).

$\omega_x$ .- módulo de resistencia a la flexión en la sección; (cm<sup>3</sup>).

$[\sigma]_c$ .- tensión admisible a la compresión; (MPa).

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

### 2.5. Aplicación de la modelación por el M.E.F en estructuras metálicas

De acuerdo con lo planteado en epígrafes anteriores, para el estudio de las tensiones y deformaciones existentes en las estructuras, se determinará que la condición de contorno aplicada en la columna será un apoyo fijo, mientras que las otras vigas estarán sometidas a la inducción de una carga longitudinal.

#### 2.5.1. Pasos para el modelado por el M.E.F en las estructuras metálicas

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).

### **2.5.2. 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)

### **2.5.3. Aplicación de solicitaciones y condiciones de contorno**

Para la aplicación de las solicitaciones, condiciones de contorno y tipo de solución mediante el menú principal de Solid Works, se debe seleccionar el procesador determinado "Solid Works Simulation". Una vez, dentro los pasos a seguir son:

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

#### **2.5.4. Determinación de los espesores de los perfiles metálicos**

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

- Cinta métrica
- Pie de rey
- Martillo de mano

La cinta métrica (ver anexo 1), de longitud 10 m, 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 (2353 B-37).

El pie de rey (ver anexo 2) 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.

#### **2.6. 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 y el tipo de material.

##### **2.6.1. 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. 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.

### **2.6.2. Chorreado abrasivo**

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



### 2.6.3. 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.

### 2.6.4. 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



## **2.7. Conclusiones del capítulo**

1. Se estableció la metodología de cálculo adecuada a solicitaciones de pandeo y flexión en perfiles de acero CT-3 según sus propiedades mecánicas.
2. Se definió la comprobación por el método de elementos finitos de las propiedades mecánicas de las estacadas según sus parámetros de trabajo.
3. Se propone un método para la protección anticorrosiva de los metales en condiciones de atmósfera altamente corrosiva.

## CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. Introducción al capítulo

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

#### Objetivo del capítulo

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.

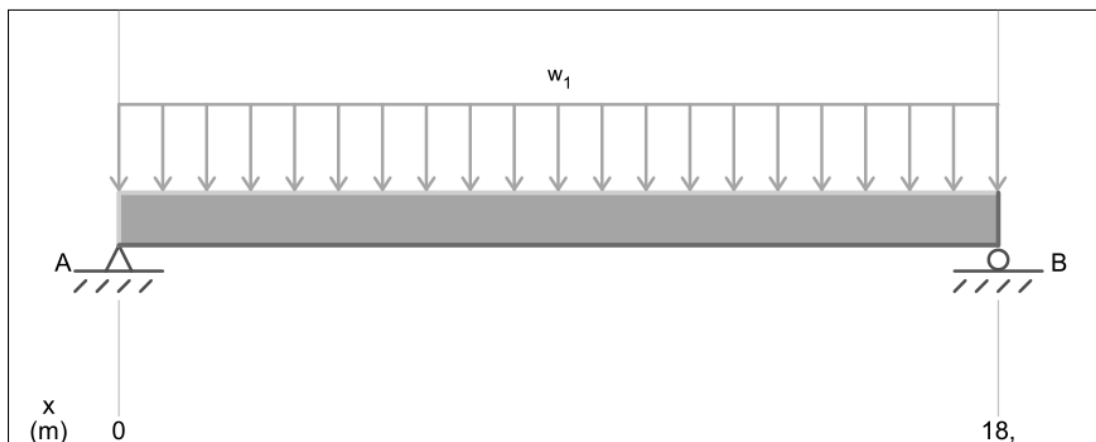
### 3.2. Cálculo de la carga total de la estructura

Para el cálculo de la carga total de la estructura se emplea la ecuación 2.1 la cual depende de la carga por estructura, la carga por elementos y la carga de vientos presentes en las estacadas. A su vez la carga por estructura que se calcula mediante la ecuación 2.1.1 depende de los tipos de vigas, su peso específico y sus longitudes, dando un peso de  $q_{est.} = 9487,464$  N. Por otra parte la carga por elementos que se calcula mediante la ecuación 2.1.2 depende de la cantidad de elementos que soportan estas estructuras, dando un peso de  $q_{ele.} = 9045,965$  N. Por otra parte la carga de viento que se calcula mediante la ecuación 2.1.3 depende del área transversal de las vigas expuestas a los vientos y a un valor de carga estipulado por la NC 285:2003 el cual es  $q = 0,9$  kN/m<sup>2</sup>, dando un peso de  $q_{viento} = 1399,500$  N. Todo esto sumado da una carga total de  $q_t = 19932,929$  N.

### 3.3. Cálculo de las reacciones en los apoyos y los momentos flectores

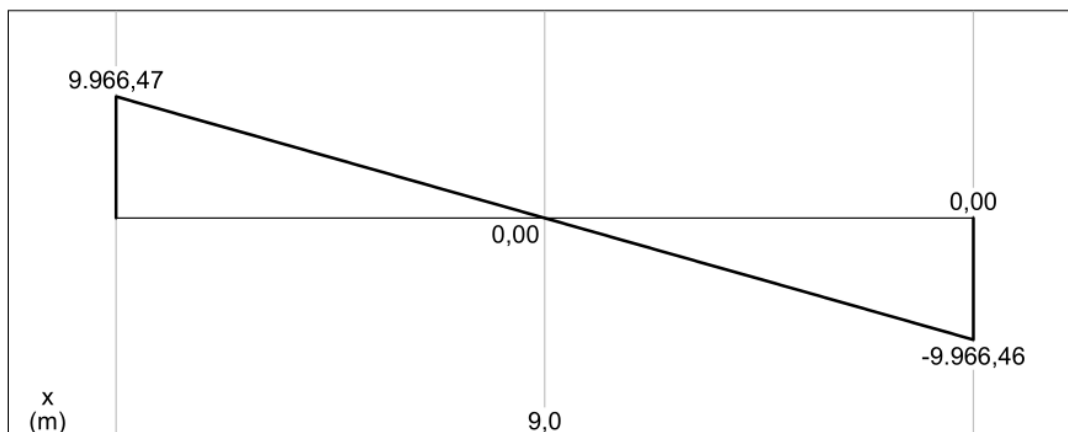
Para la determinación de las reacciones en los apoyos y los momentos flectores se empleó el software MD Solid 3.4 y los resultados se exponen a continuación en la figura 3.1:

Según Software MD Solid 3.4

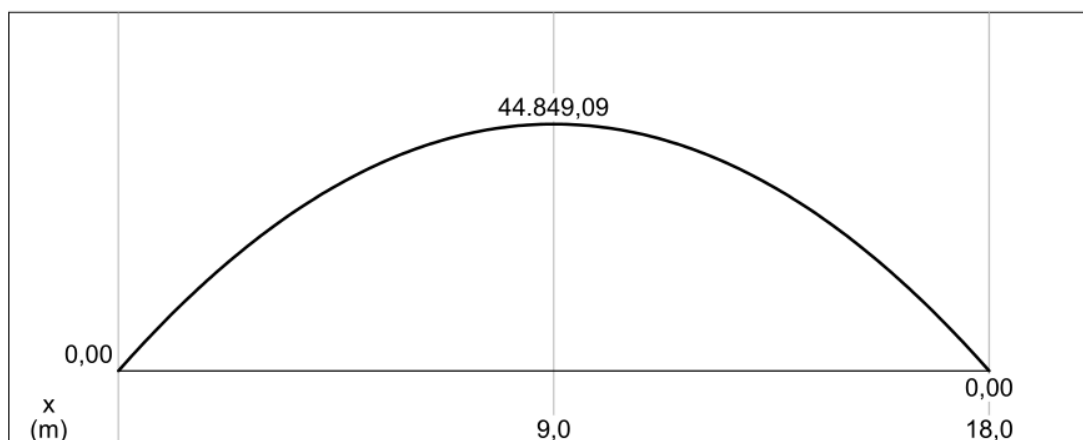


$w_1 = 1107,385 \text{ N/m (down)}$

$A_y = 9.966,47 \text{ N (up)}$   
 $B_y = 9.966,47 \text{ N (up)}$



Shear Diagram (N)



Moment Diagram (N-m)

Figura 3.1. Cálculo de las reacciones en los apoyos y el momento flector máximo.

### 3.4. Cálculo de la resistencia mecánica de estructuras metálicas

Para el cálculo de la resistencia mecánica de las estructuras es necesario conocer el estado de tensiones y deformaciones de las mismas. Distinguiendo dos tipos de solicitaciones en las estructuras analizadas que serían el pandeo por compresión (flexión longitudinal) y la flexión.

#### 3.4.1. Cálculo de la resistencia a la estabilidad por compresión

Para el cálculo de la resistencia por compresión de la estructura se debe calcular primeramente la esbeltez empleando la ecuación 2.2 la cual depende del radio de giro de la sección que a su vez se determina mediante la ecuación 2.2.1 y depende del momento de inercia de la sección que viene tabulado en (Feodosiev, 1985)  $I_{min} = 38,9 \text{ cm}^4$  dando un radio de giro de  $i = 0,018 \text{ m}$ ; para obtener una esbeltez  $\lambda = 1012$ .

#### 3.4.2. Cálculo de la carga crítica

Para el cálculo de la carga crítica se emplea la ecuación 2.4 la cual depende del módulo de elasticidad del material que es de  $E = 2,04 \times 10^5 \text{ MPa}$ , la longitud de la barra que es  $l = 18 \text{ m}$  y el coeficiente de reducción de la longitud que es  $\mu = 1$ ; obteniendo una carga crítica  $P_{crit} = 1118,555 \text{ N}$ .

#### 3.4.3. Cálculo de la tensión crítica

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 ecuación 2.5 y su valor es de  $\sigma_{crit} = 1,965 \text{ MPa}$ .

#### 3.4.4. Análisis de la condición de estabilidad

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 fue  $\varphi = 0,9995$ , obteniendo un valor de  $[\sigma]_{crit} = 119,941 \text{ MPa}$ .

Se determina la tensión máxima mediante la ecuación 2.6 la cual depende de la carga crítica que es de  $P_{crit} = 111855,517 \text{ N}$ , el área de la sección transversal de la viga

que es de  $F = 12,3 \text{ cm}^2$  y un coeficiente de seguridad que oscila entre 1,6 y 3; obteniendo  $\sigma_{m\acute{a}x} = 30,313 \text{ MPa}$ .

Como  $\sigma_{m\acute{a}x} < \sigma_{crit}$  entonces no hay pérdidas de estabilidad.

Para la condición de resistencia analizada en la ecuación 2.7 se obtuvo que la tensión máxima es de  $\sigma_{m\acute{a}x} = 52,995 \text{ MPa}$ .

El significado físico de este resultado expresa que por cada  $\text{cm}^2$  la columna está sometida a 52,995 MPa de esfuerzo, valor este que no está ni próximo al admisible, existiendo un coeficiente de seguridad de 3,96; que está por encima del permisible por lo que plantea que la estructura resiste a las condiciones de trabajo.

#### **3.4.5. Análisis de las vigas sometidas a flexión**

La sollicitación de flexión fue realizada a través del software MD Solid 3.4 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 MD Solid 3.4.

Por lo que la tensión máxima surgida, se determinó a través de la expresión 2.8, sustituyendo, su resultado es de  $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,14 \text{ MPa}$ .

Este valor de tensión máxima representa que soporta las condiciones de trabajo a los que está sometida debido a que no se alcanza el valor de tensión admisible.

#### **3.5. Resultados de la modelación por el método de elementos finitos**

El modelo mecánico obtenido por el MEF proporciona como resultados los valores de los esfuerzos residuales y deformaciones en cada elemento de la malla y en cada instante de tiempo, esto permitió determinar la distribución y magnitud de los esfuerzos residuales. De igual forma proporcionó las deformaciones que sufre la pieza, tanto al final del proceso como a lo largo de éste.

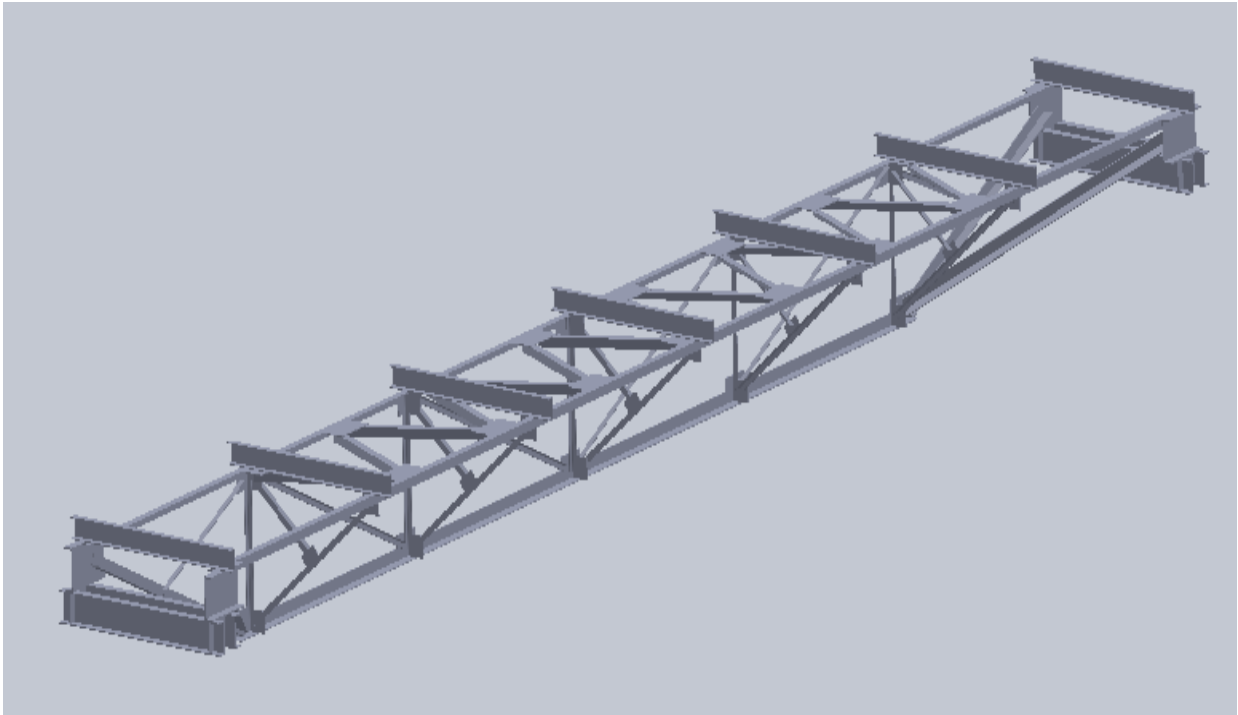


Figura 3.2. Modelación de la pieza

#### **3.5.1. Resultado para condiciones normales**

A la pieza se le aplicaron siete fuerzas de 125,64 N distribuidas por los 7 apoyos que corresponden a la carga actual de 9045,965 N atribuible a las tuberías y los fluidos existentes, también se le aplicó una presión de  $900 \text{ N/m}^2$  correspondiente a la carga de viento estipulada en la norma NC 285:2003 para la zona oriental del país y se le aplicaron restricciones en las caras que van empotradas en las columnas quedando tal como lo indica la figura 3.3.

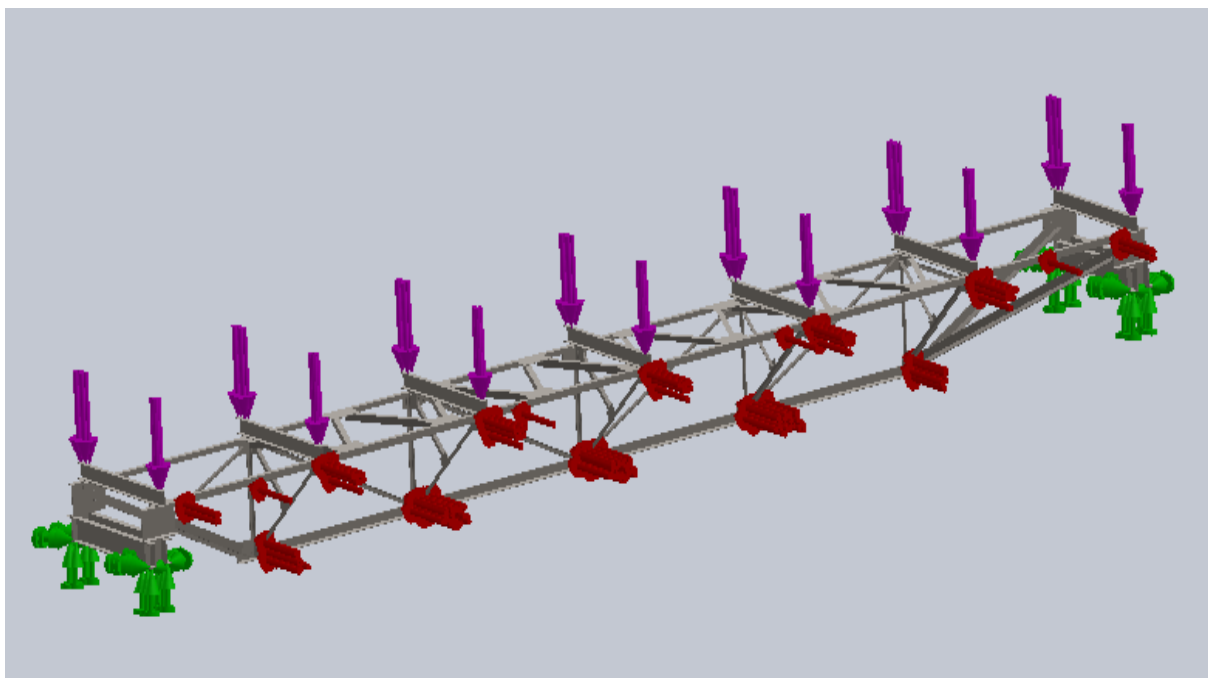


Figura 3.3. Pieza con las fuerzas y restricciones

El valor máximo de esfuerzo alcanzado durante el proceso es 140,333 MPa, que viene a ser el valor máximo de esfuerzo transitorio y el valor del límite elástico del material es de 250 MPa, alcanzando solamente una deformación de 1,048 mm y alcanzando un factor de seguridad de 1,78 tal y como lo muestran las figuras 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7.

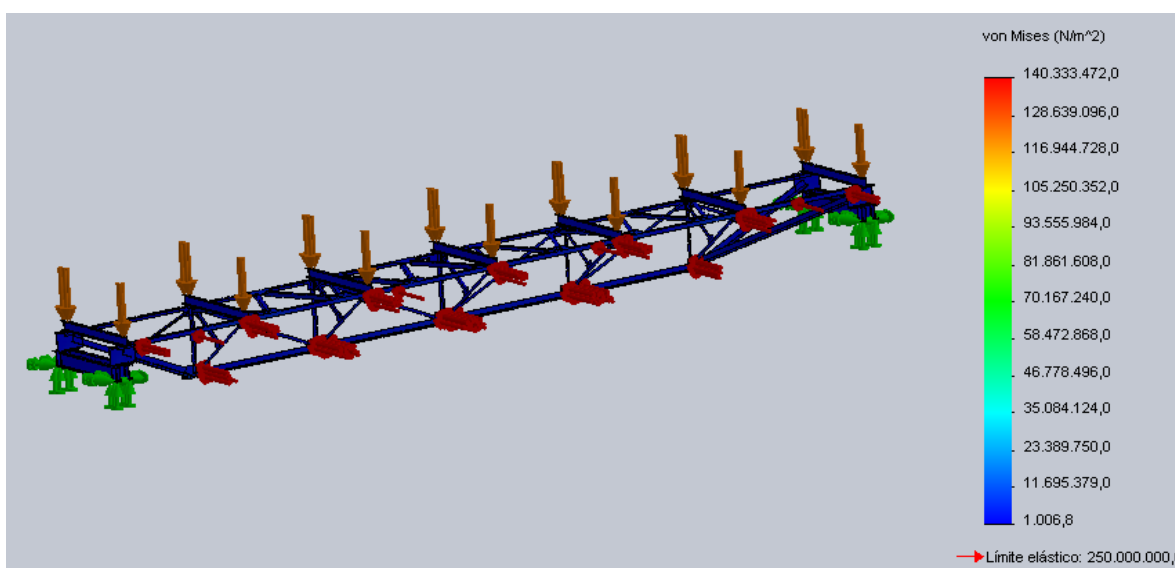


Figura 3.5. Tensiones de Von Mises



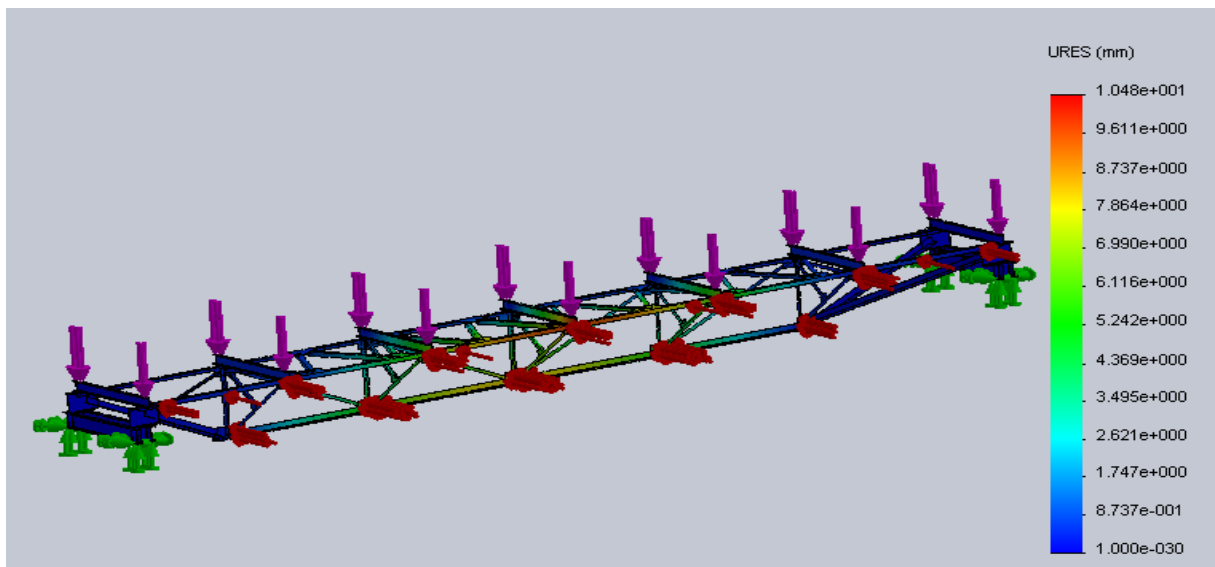


Figura 3.6. Deformaciones de la pieza

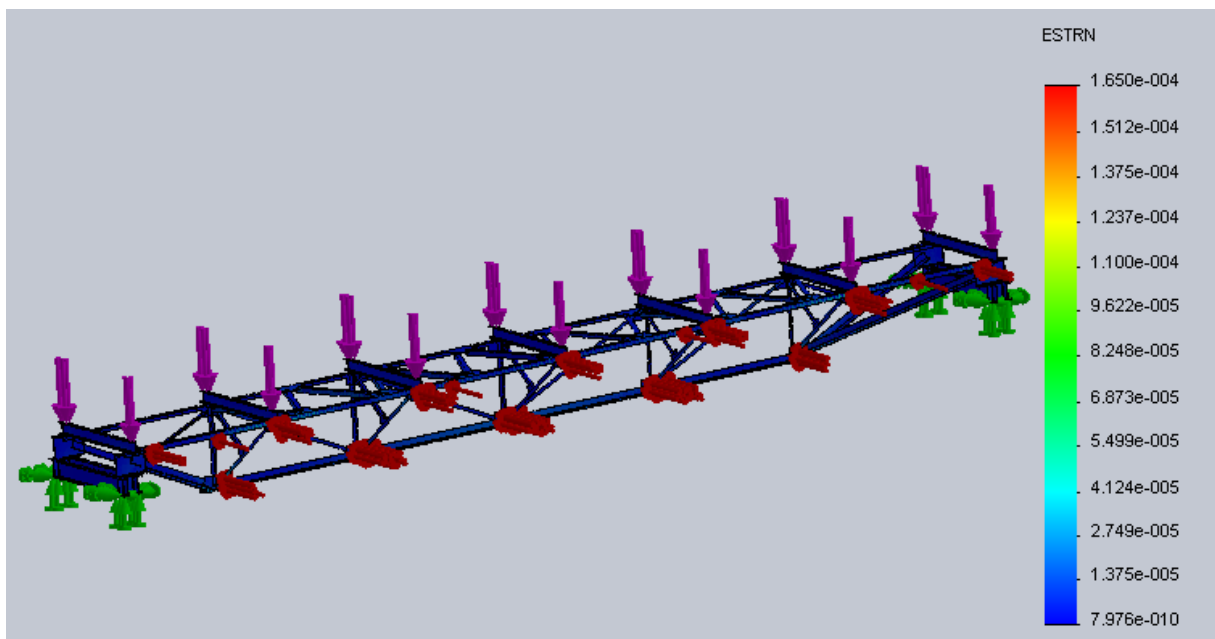


Figura 3.7. Deformaciones unitarias

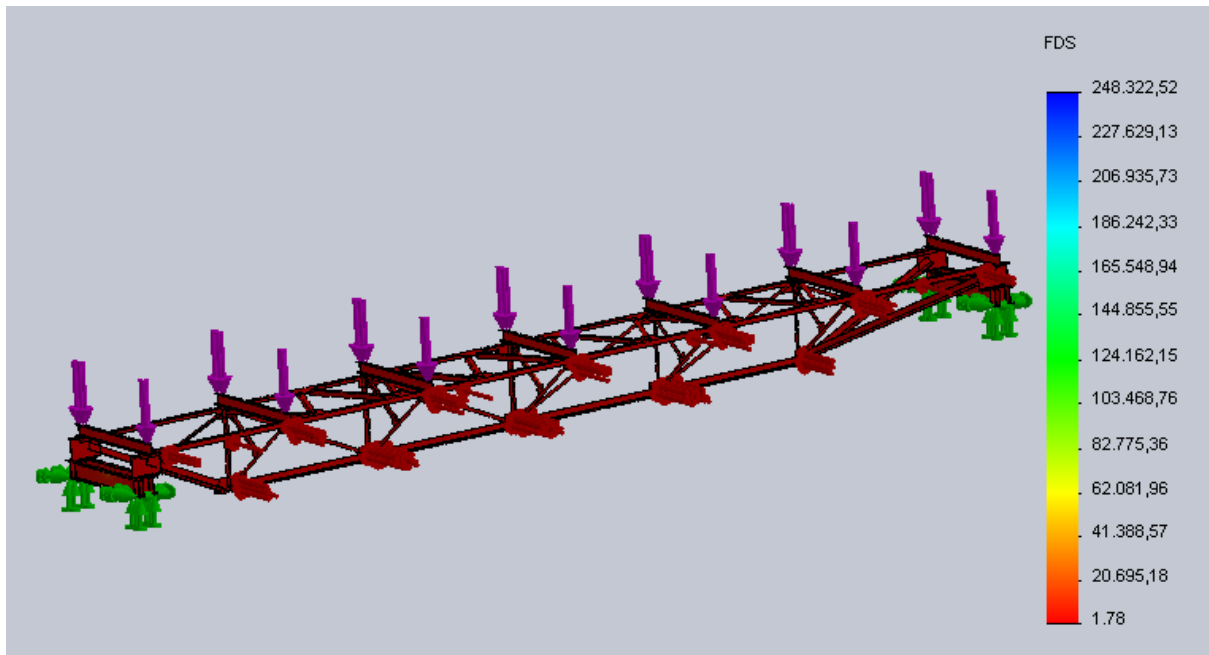


Figura 3.8. Factor de seguridad

### 3.5.2. Resultado para ciclones de alta categoría

Para este caso se mantienen las siete fuerzas de 125,64 N distribuidas por los 7, también se le aplicó una presión de 1834 N/m<sup>2</sup> correspondiente a la carga que ejercen los vientos de hasta 195 km/h calculada por la norma NC 285:2003 y se le aplicaron las restricciones.

El valor máximo de esfuerzo alcanzado durante este proceso es de 192,23 MPa, que viene a ser el valor máximo de esfuerzo transitorio y el valor del límite elástico del material es de 250 MPa, alcanzando solamente una deformación de 1,806 mm y alcanzando un factor de seguridad mínimo de 1,3 tal y como lo muestran las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12.

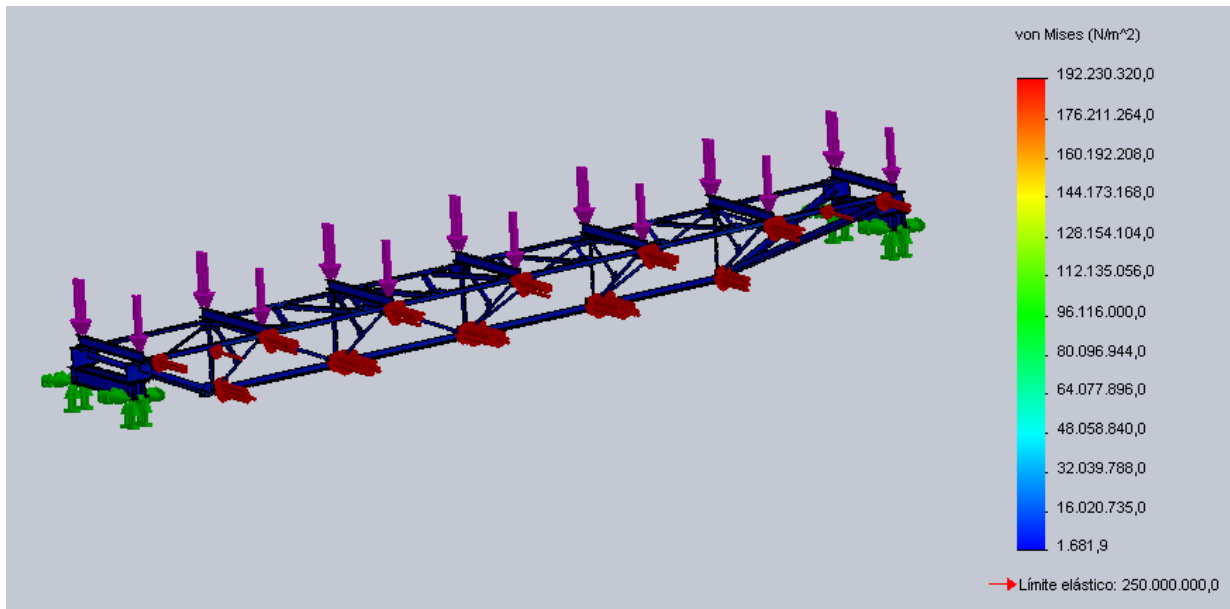


Figura 3.9. Tensiones de Von Mises

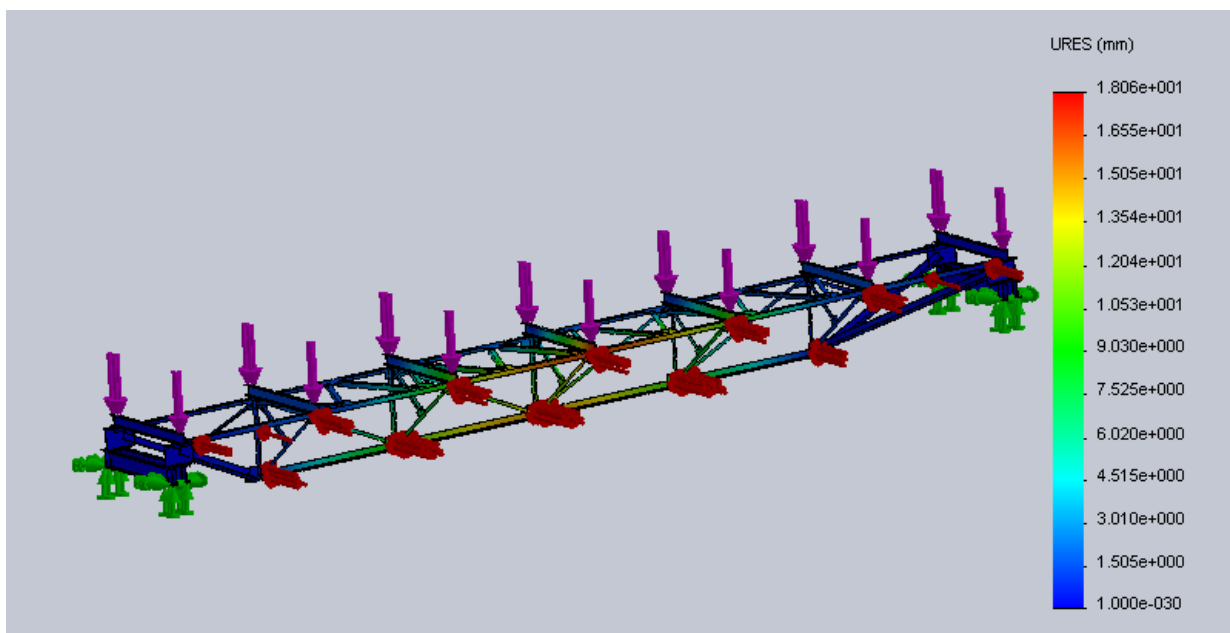


Figura 3.10. Deformaciones de la pieza

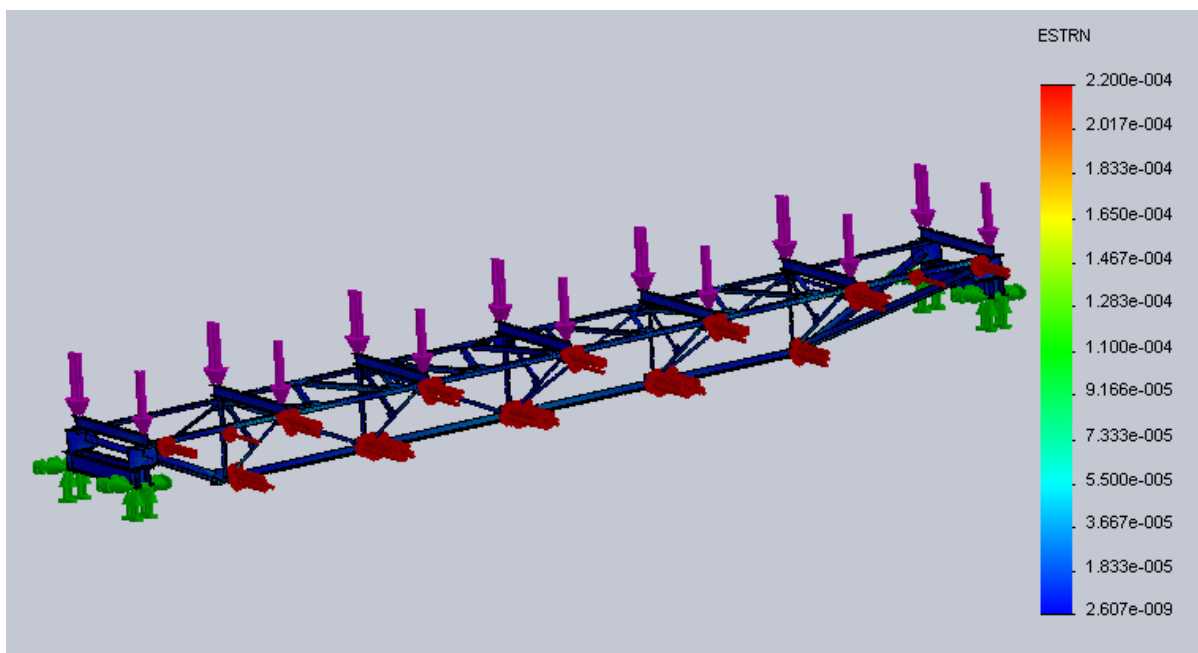


Figura 3.11. Deformaciones unitarias

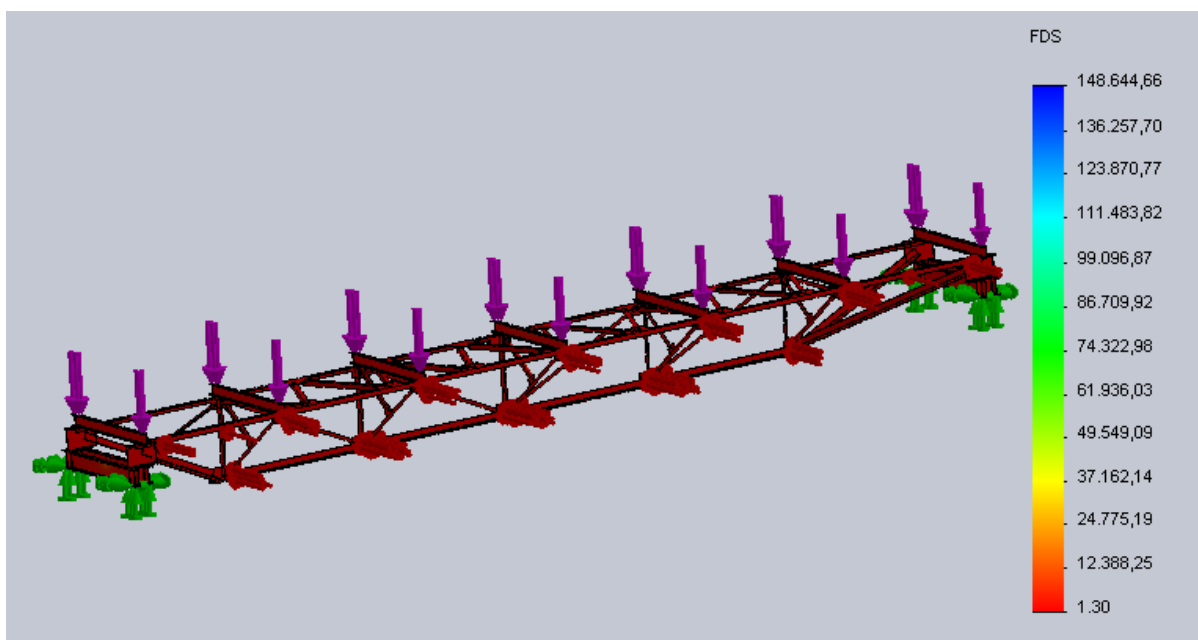


Figura 3.12. Factor de seguridad

### **3.6. Aplicación de un sistema de mantenimiento para la conservación**

Debido a la atmósfera altamente corrosiva de la localización en la que se encuentran las estacadas se propone mantener las superficies metálicas cada 8 años, con preparación de la superficie y a la aplicación de la pintura, para lo cual se utiliza 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 4 m<sup>2</sup> por litro mediante un secado de tres horas. Como tiempo de repintado se estableció 24 horas máximo después de la primera capa. Para el depósito de la capa de acabado se seleccionó la mezcla al 1x1 de Devoxy 89 color gris con un rendimiento de 4 m<sup>2</sup> por litro y alcanzando un espesor de 100 Micras, con un tiempo de secado de tres horas.

### **3.7. Valoración económica**

Con este nuevo diseño de las estacadas se logran eliminar 60 m<sup>2</sup> de estructuras metálicas por cada tramo de 18 m, sabiendo que en la empresa hay 186 unidades de estacadas dando un total de 11160 m<sup>2</sup> de superficies metálicas que se dejarían de mantener, ahorrando así 140,000.00 CUC que pueden ser destinados a la perfección de su línea de producción.

### **3.8. Impacto ambiental**

Este trabajo aporta una metodología para hacer un rediseño de las estacadas aéreas y su protección ante 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. Esta investigación tiene gran importancia también en el orden económico, ya que permite ahorro por concepto de mantenimiento y evita hacer grandes inversiones.



### 3.9. Conclusiones del capítulo

- Los cálculos a pandeo demuestran que las estructuras metálicas soportan las cargas a las que están sometidas dando un factor de seguridad operativo de  $F.O.S.=4,6$ .
- El valor máximo de esfuerzo obtenido por el MEF para las condiciones normales es de 140,333 MPa que está muy por debajo del valor del límite elástico del material es de 250 MPa, alcanzando un factor de seguridad mínimo de 1,78 y para ciclones de vientos hasta 195 km/h un valor máximo de 192,23 MPa, que también está por debajo del límite elástico del material, dando un factor de seguridad mínimo de 1,3.
- Se realizó una valoración económica del empleo de las técnicas de conservación anticorrosiva.



## CONCLUSIONES GENERALES

- Se determinó mediante el análisis de pandeo que las estructuras garantizan la máxima resistencia a las cargas de trabajo actuales a las que están sometidas, dando un valor de tensión máxima de 52,995 MPa y el valor máximo permisible del material es de 120 MPa.
- Se comprobó mediante el MEF que las estructuras soportan las cargas de viento a las que están sometidas dando valores de factor de seguridad de 1,78 para condiciones normales y de 1,3 para vientos de ciclones de alta categoría.
- Se aplicó un método de protección anticorrosiva que permitirá incrementar la vida útil de las estructuras por afectaciones de agentes corrosivos presentes en la atmósfera.



## **RECOMENDACIONES**

- Utilizar este trabajo como referencia para hacer el rediseño de las estacadas aéreas de la Empresa Mecánica del Níquel “Gustavo Machín Hoed de Beché”.
- 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, bajo diferentes condiciones, para garantizar una protección más integral de estructuras como las analizadas en el presente trabajo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. (2008). Obtenido de Werner Sölken: <http://www.wermac.org>
2. Ailor, W. (1986). *Atmospheric Corrosion*. New York: John Wiley and Sons.
3. APREMAT. (2000). *Apoyo al Proceso de Reforma de la Educación Media en el Área Técnica. Manual de Funciones y Guía de Implantación de un Sistema de Mantenimiento Preventivo Programado*.
4. Arroyave, P. C. (1995). *El papel del no2 en la corrosión atmosférica del acero*. Universidad: Complutense de Madrid.
5. Avila, A. V. (2005). *Influencia de los parámetros*. Holguín, Cuba.
6. Beer, F. P., Johnston, E. R., Mazurek, D. F., & Eisenberg, E. R. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros. Estática. Novena Edición*. Mc Graw Hill.
7. Berman, I. (1982). *Fluidized Bed Combustion: FBC presents a way to burn coal with minimal SO2 and NOx emissions. Development work is leading into demonstration units by a number of manufacturers*. POWER ENGINEERING.
8. Biswas, A., & Geping, Q. (1987). *Environmental Impact Assessment for Developing Countries. United Nations University, Natural Resources and the Environment Series, vol. 19*. London: Tycooly Publishers.
9. Drake, R. M., & Walter, R. J. (2010). *Design of Structural Steel Pipe Racks*.
10. Feodosiev, V. (1985). *Resistencia de Materiales*. Moscú: Editorial MIR.
11. Fernández, L. G. (1988). *Resistencia de Materiales*. La Habana. Cuba: Pueblo y Educación.
12. Galván, S. J. (1986). *Estudio de la capacidad anticorrosiva de las películas de pintura mediante técnicas electroquímicas*. España: Universidad complutense de Madrid.
13. García, P. O. (2011). *gestión moderna del mantenimiento industrial, principios fundamentales*.
14. Geracimienko, A. (1987). *Protección de la corrosión, el envejecimiento y la biodegradación de máquinas, equipamiento y construcciones*. Moscú: Construcción de materiales.
15. Gonzáles, G. J. (2016). *Propuesta de mantenimiento preventivo y planificado para la línea de producción en la empresa Latercer S.A.C.*
16. Guliaev. (1986). *Ciencia de los materiales. Metalurgia*. Moscú.
17. Hutton, D., & Hullman, W. (2004). *Fundamental of Finite Elements Analysis*. USA: McGraw-Hill.
18. Liublinski, E. R. (1987). *Protección electroquímica contra la Corrosión*. Moscú.
19. Megson, T. (2000). *Structural and Stress analysis. Second Edition*. Oxford. UK:



Butterworth-Heinemann.

20. Muñoz, A. B. (2004). *Mantenimiento industrial*.
21. Muñoz, L. R., & Uruchurtu, C. J. (2001). *Caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en la zona metropolitana de la ciudad de México*.
22. NC:285:2003. (s.f.). *Cargas de viento. Método de cálculo*.
23. Pérez, P. C. (1997). *Estudio de los sistemas de protección de las superficies metálicas expuestas a la intemperie*. Universidad de Santiago de Compostela.
24. Sablón, J. A. (2008). *Fallas de estructuras metálicas instaladas en la planta de lixiviación de la Empresa Ernesto Che Guevara sometidas a atmósfera corrosiva*. Moa.
25. Strebkov, V. (2005). *Anti-Corrosion Protection for Structural Members and Buildings at Metallurgical Plants*.

## ANEXOS

Anexo 1: Cinta métrica utilizada en las mediciones.



Anexo 2: Pie de rey utilizado en las mediciones.

