

## Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

Henry Ronald Villón Barona <sup>(1)</sup> Julián Peña E. <sup>(2)</sup>  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción <sup>(1) (2)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
herovill@espol.edu.ec <sup>(1)</sup>  
Ing. Mecánico, Profesor FIMCP-ESPOL, jpena@espol.edu.ec <sup>(2)</sup>

### Resumen

*El estudio se enfoca en el análisis de la Integridad Estructural a una chimenea de una PLANTA CEMENTERA; fue construida en el año 2003 y su diseño original contemplaba la eliminación de los gases de combustión de la quema de carbón. Sin embargo, se ha utilizado coque como combustible, el cual posee un mayor porcentaje de azufre. Esto ha producido una corrosión acelerada y gran pérdida de espesor.*

*El objetivo de esta tesis es usar como referencia Normas como: Inspección Basada en Riesgo, Aptitud para el Servicio y herramientas computacionales especializadas en el análisis de esfuerzos.*

*Se realizó la inspección aplicando técnicas de Ensayos No Destructivos como: inspección visual, medición de espesores por ultrasonido y mediciones de la temperatura real de trabajo de la chimenea; la información de espesores se la utilizó para determinar la velocidad de corrosión y calcular el tiempo de vida remanente de la chimenea.*

*Para establecer los esfuerzos a los cuales está sometida la chimenea se realizó la simulación respectiva en el programa estructural SAP2000; además se propone la construcción de una chimenea concéntrica para mejorar la Integridad Estructural de la chimenea existente.*

**Palabras Claves:** *Integridad Estructural, corrosión, esfuerzos, simulación.*

### Abstract

*The study is focused in the analysis from the Structural Integrity to a chimney of a CEMENT PLANT; this chimney was built in the year 2003 and its original design contemplated the elimination of the combustion gases of it burns it of coal. However, it has been used coke like fuel, which possesses a bigger percentage of sulfur. This has produced a quick corrosion and a great loss of thickness.*

*The objective of this thesis is to use like reference such Norms as: Based inspection in Risk, Fitness for Service and computational tools specialized in stress analysis.*

*The inspection was carried out applying Non-Destructive Test like visual inspection, thickness measurement by ultrasonic and real temperature measurements on the stack; the thickness information was used to determine the corrosion rate and to calculate the remainder life time of the stack.*

*To establish the stress to which the stack was subjected was carried out the respective simulation in the structural program SAP2000; also proposes the building a concentric stack to improve the Structural Integrity of the existing stack.*

**Keywords:** *Structural Integrity, corrosion, stress, simulation.*

## 1. Introducción

En la actualidad las grandes industrias se ven en la necesidad de reparar daños o averías en componentes sin interrumpir su operación, ya que el detener el elemento para su reparación, implica cuantiosas pérdidas.

Este trabajo consiste en establecer la integridad estructural de una chimenea que trabaja en una planta cementera, para lo cual se utilizó como referencia varias herramientas, entre ellas la Inspección Basada en Riesgo para evaluar el nivel de riesgo de la chimenea y proyectar la factibilidad de que siga operando en las condiciones actuales.

## 2. Inspección y planteamiento de la solución

Debido a que la chimenea ha tenido una gran pérdida de espesor (de 8 mm de espesor inicial a 5 mm de espesor actual) durante un tiempo de 7 años de funcionamiento, se va a realizar una inspección, la cual permitirá obtener información necesaria para establecer la condición actual de la misma. (Ver figura 1).



Figura 1. Vista panorámica de la chimenea

Para realizar la inspección y dar un correcto diagnóstico del estado actual de la estructura, se deben realizar varios tipos de inspección, entre las cuales tenemos:

- Inspección visual
- Medición de espesores
- Medición de la temperatura

## Inspección visual

La inspección visual consistió en determinar las dimensiones básicas y establecer el tipo de corrosión presenta la chimenea.

Las dimensiones básicas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Datos básicos de la chimenea

RESUMEN DE LOS DATOS DE LA CHIMENEA	
ALTURA	50 m
DIÁMETRO	1.4 m
MATERIAL	ASTM A-36
COMBUSTIBLE	COQUE
DIÁMETRO DEL MANHOLE	0.75 m
DIÁMETRO DE LA CIMENTACIÓN	1.9 m
NÚMERO DE PERNOS EN LA CIMENTACIÓN	21
DIÁMETROS DE PERNOS	3/4"

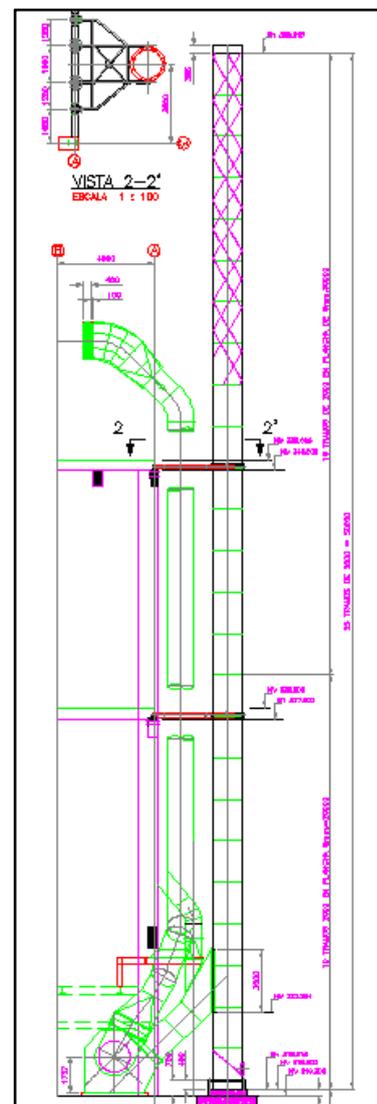


Figura 2. Plano general de la chimenea

Mediante la inspección visual se observó corrosión generalizada en toda la chimenea, como se muestra en la figura 3.

Este fenómeno de corrosión se presenta debido a que las superficies de la chimenea se encuentran expuestas a un ambiente corrosivo industrial, no existe protección externa para evitarla y el material con el que se encuentra construida (ASTM A 36) no posee buenas propiedades contra la corrosión en ese medio.



Figura 3. Vista panorámica de la chimenea industrial

En algunas partes de la chimenea, el problema de la corrosión se encuentra en un estado más avanzado, donde se observa una corrosión localizada, lo que ha producido una perforación en la chimenea. (Ver figura 4).



Figura 4. Corrosión localizada

### Medición de espesores

Se realizó la medición de espesores de la pared de la chimenea, tal medición fue realizada por personal capacitado de la compañía donde se encuentra la estructura de análisis; estos espesores fueron procesados para determinar la velocidad de corrosión, desgaste y el Tiempo de Vida Remanente de la chimenea.

Tabla 2. Resultado de espesores

Anillo No:	AÑO 2003		AÑO 2011		Tiempo de Vida Remanente [años]
	Espesor de Diseño [mm]	Espesor menor 2011 [mm]	Tasa de corrosión [mpy]	Desgaste [%]	
1	8	6,4	0,2	20,0	27
2	8	4,9	0,4	38,8	10
3	8	3,2	0,6	60,0	4
4	8	3,8	0,5	52,5	5
5	8	2,4	0,7	70,0	2
6	8	2,9	0,6	63,8	3
7	8	3,0	0,6	62,5	3
8	8	3,3	0,6	58,8	4
9	8	3,0	0,6	62,5	3
10	8	3,2	0,6	60,0	4
11	6	3,3	0,3	45,0	7
12	6	4,0	0,3	33,3	12
13	6	4,0	0,3	33,3	12
14	6	4,2	0,2	30,0	14
15	6	4,0	0,3	33,3	12
16	6	4,4	0,2	26,7	17
17	6	3,9	0,3	35,0	11
18	6	4,7	0,2	21,7	23
19	6	4,1	0,2	31,7	13
20	6	4,0	0,3	33,3	12
21	6	4,0	0,3	33,3	12
22	6	3,9	0,3	35,0	11
23	6	3,0	0,4	50,0	5
24	6	3,2	0,4	46,7	6
25	6	2,9	0,4	51,7	5

Analizando la tabla 2, se puede notar que el menor TVR se encuentra localizado en el anillo 5, el cual presenta mayor pérdida de espesor y su TVR es de 2 años.

### Medición de temperaturas

Para poder obtener la temperatura real de trabajo de la chimenea y no únicamente la correspondiente a los gases, obtenida del cuarto de control, se realizó una medición de las temperaturas en los diferentes anillos que conforman la misma.

Con las mediciones realizadas, se obtuvo que la temperatura más alta es de 60°C y se encuentra en la zona de entrada de los gases de combustión; sin embargo, en el resto de la chimenea la tendencia de la temperatura es a disminuir, llegando a un valor mínimo de 50 °C en la parte más alta de la chimenea (50 m.)

### Diseño de la matriz de riesgo

Una vez finalizadas las inspecciones, se crea la matriz de riesgo para determinar el nivel de riesgo de la chimenea, estos se deben establecer las probabilidades de fallas así como las consecuencias de las mismas.

Los modos de fallas que pueden afectar las chimeneas se mencionan a continuación:

- Corrosión
- Corrosión acelerada debido al uso de otros combustibles con mayor contenido de azufre
- Daños por fluencia lenta e incremento de la temperatura de los gases
- Fallas por flexión a causa de fuerzas de viento

Una vez que se establecieron y evaluaron los posibles modos de falla, se deben analizar las consecuencias de los mismos; estas consecuencias son evaluadas en función de los siguientes daños potenciales:

- Daños al personal de la planta cementera
- Daños a áreas cercanas de población
- Daños sobre las instalaciones
- Daños sobre la producción
- Daños sobre el medio ambiente

Evaluados los modos de fallas y las consecuencias de las mismas, se construye de la matriz de riesgo que se muestra a continuación; esta matriz relaciona el tipo de falla con la consecuencia que representa el mismo.

**Tabla 3.** Matriz de Riesgo de la chimenea

R.B.I		Probabilidad de Falla					
		Despreciable	Bajo	Medio	Alto	Muy Alta	
		5	4	3	2	1	
Consecuencia de falla	Muy Alta	4	3	4	5	6	7
	Alto	3	2	3	4	5	6
	Medio	2	0	2 Termofluencia	3 Corr. Acelerada y flexión por acción del viento	4	5 Corrosión
	Bajo	1	0	1	2	3	4
	Despreciable	0	0	0	1	2	3

De acuerdo a la matriz de riesgo se establece que el riesgo de la chimenea es Medio-Alto.

### Propuesta de la alternativa para la mejora

La propuesta consiste en realizar un encamisado concéntrico conformado por acero que tengan altas propiedades anti-abrasivas y una alta resistencia a la corrosión; el encamisado será hasta la altura de 18 m porque es la zona más afectada por la corrosión, será construido con acero ASTM A 588 y además se le aplicará un sistema de pintura epoxica con poliamida.

De esta manera se tomarían las acciones correctivas del diseño inicial en el que no se consideró la acelerada corrosión del material debido al ambiente industrial agresivo.

### 3. Simulación y análisis de esfuerzos

Se procederá con la simulación y análisis de esfuerzos que actúan sobre la chimenea de molienda de coque.

Los esfuerzos se calcularán a través de un programa de simulación especializado (SAP2000), el cual reduce en forma notable el tiempo de análisis.

Para realizar las simulaciones se ha optado por el uso de un programa de Auto-Cad para definir la geometría del modelo y luego importar este archivo a SAP2000, para posteriormente definir los parámetros necesarios para realizar la simulación respectiva.

Para dichas simulaciones se va a considerar que la chimenea está conformada por elementos tipos Shell (cascarones), debido a que éstos son utilizados para el modelado de estructuras de sección transversal delgada con una relación diámetro, espesor (D/e) es menor a 0.1.

#### Condiciones de Frontera para la Simulación

Para la correcta simulación de cualquier estructura y en este caso una chimenea, se deben establecer las condiciones de fronteras adecuadas; de no hacerlo, los resultados serían incorrectos pues, se estará simulando cualquier escenario menos el que realmente sucede.

Para establecer estas condiciones de frontera se procede a analizar la chimenea como una estructura apoyada en 4 regiones principales, las cuales se mencionan a continuación:

- Anillo flotante superior
- Anillo flotante inferior
- Entrada de gases de combustión
- Anclaje de la cimentación

En la siguiente tabla se muestra como quedan designadas las condiciones de frontera.

**Tabla 4.** Condiciones de frontera

REGIÓN	TIPO DE RESTRICCIÓN					
	DESPLAZAMIENTO			ROTACIÓN		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Anillo Superior	x	x				
Anillo Inferior	x	x				
Entrada de gases de combustión	x	x	x	x	x	x
Anclaje a la cimentación	x	x	x	x	x	x

### Tipos de cargas a considerar

Para realizar una simulación más real de la chimenea se deben tener en consideración la mayor cantidad de cargas que afectan el desempeño de la estructura, para lo cual se han considerado cuatro cargas principales actuando sobre la misma, así como sus respectivas combinaciones de cargas, como se muestra a continuación.

- Carga muerta
- Carga térmica
- Carga de viento
- Carga sísmica

Las cargas muertas, temperaturas, viento y sísmica mencionadas anteriormente son las cargas mínimas de diseño, pero estas cargas nunca actúan de forma independiente sobre una estructura, por tal razón se hace imprescindible utilizar las combinaciones de cargas adecuadas, ya sea para el diseño o el análisis de esfuerzos en cualquier estructura.

El propósito de éstas combinaciones es el de incrementar las cargas para tomar en cuenta las incertidumbres al estimar las magnitudes de las cargas muertas y vivas. (Establecer factores de seguridad)

Las combinaciones de cargas adecuadas se las obtiene del Manual AISC LRFD y se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 5.** Combinaciones de cargas según el Código AISC

$1.4D$
$1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
$1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R) + (0.5L \text{ or } 0.8W)$
$1.2D + 1.6W + 0.5L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
$1.2D \pm 1.0E + 0.5L + 0.2S$
$0.9D \pm (1.3W \text{ or } 1.0E)$

Dónde:

- D: Carga Muerta
- L: Carga viva debida a la ocupación
- L<sub>r</sub>: Carga viva en el techo
- S: Carga de nieve
- R: Carga debida al efecto del agua estancada sobre la estructura
- W: Carga de viento
- E: Carga sísmica

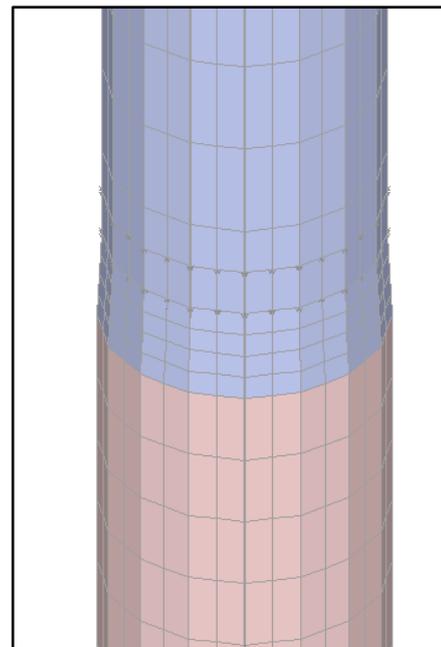
En SAP2000 estas ecuaciones se conocerán de la siguiente manera:

COMB. 1	$1.2D+1.6L$
COMB. 2	$1.2D+1.6W+0.5L$
COMB. 3	$1.2D\mp 1.0E+0.5L$

Las simulaciones se realizaron en dos condiciones, el estado actual y la alternativa de mejora.

Para realizar las simulaciones se utilizó el siguiente procedimiento:

- Creación del modelo geométrico en Auto-Cad
- Importación a SAP2000
- Discretización de la chimenea
- Asignación de cargas
- Asignar condiciones de frontera
- Cálculos respectivos
- Post procesamiento de resultados



**Figura 5.** Discretización de la chimenea

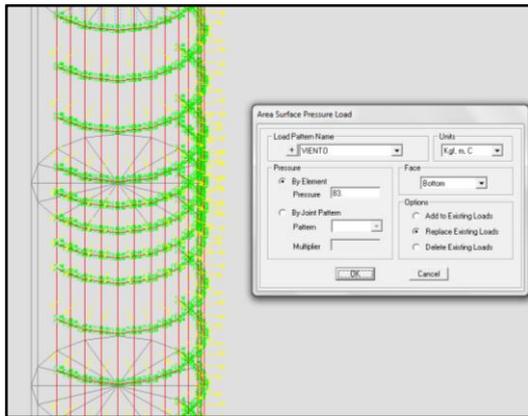


Figura 6. Asignación de cargas

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones respectivas.

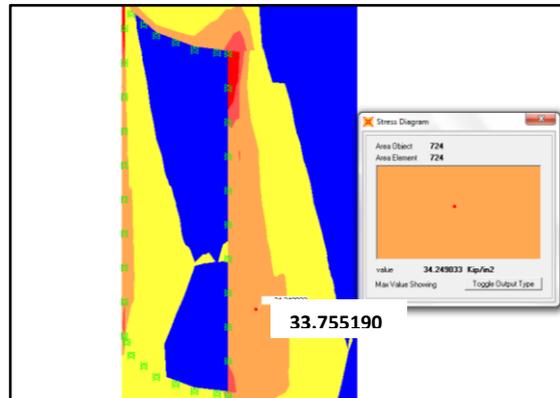


Figura 8. Mapa de Esfuerzos de la chimenea (Condición actual)

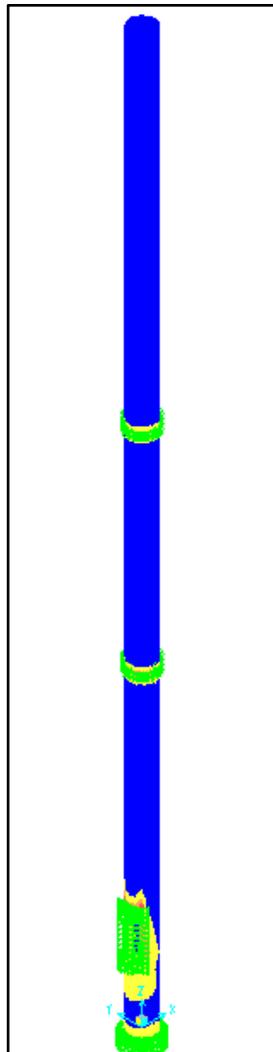


Figura 7. Post Procesamiento de resultados

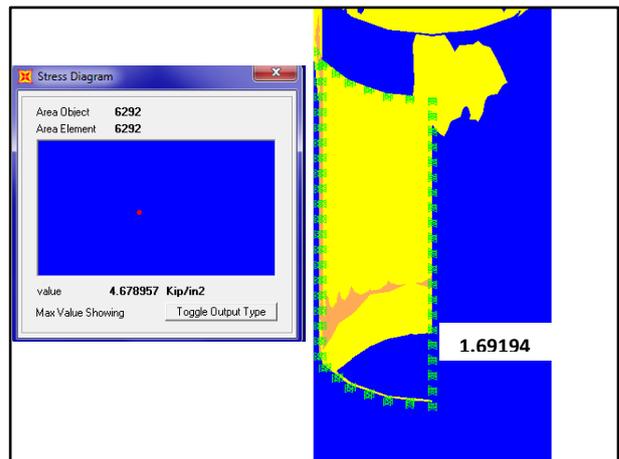


Figura 9. Mapa de Esfuerzos de la chimenea (Alternativa de mejora)

#### 4. Análisis de factibilidad

Una vez realizadas todas las inspecciones, simulaciones y planteada la alternativa de solución, es necesario hacer un análisis de factibilidad de la misma. Este se lo realiza para determinar si realmente es factible su ejecución.

Este análisis se va a dividir en dos secciones: un análisis técnico y un análisis económico para luego determinar si la opción a implementar es viable.

### Análisis técnico

En el análisis técnico se determinará si la nueva chimenea cumple con los requerimientos técnicos que se establecieron anteriormente o si existe alguna restricción que imposibilite el desarrollo del proyecto en su parte técnica.

También se van a analizar las fortalezas y las debilidades de la alternativa propuesta, con lo cual se evaluará el desempeño de la solución en base a los siguientes criterios:

- Resistencia a la corrosión (Vida útil)
- Proceso de soldadura a utilizar
- Construcción (Tiempo de ejecución)
- Estabilidad estructural (Análisis de esfuerzos)
- Resistencia de la cimentación

En esta tabla se muestran las fortalezas y debilidades de la solución planteada.

**Tabla 6.** Fortalezas y debilidades

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistencia a la corrosión y mayor punto de fluencia que el material de construcción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo de reparación puede ser un poco elevado.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El proceso de soldadura es relativamente sencillo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tal vez sea necesario un refuerzo en la cimentación actual.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extiende la vida útil de la estructura.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los esfuerzos disminuyen, porque se consigue independencia estructural.</li> </ul>	

### Análisis económico

En esta sección se presenta el análisis económico de la implementación de la construcción de la chimenea concéntrica versus el costo que se generaría por la detención de la chimenea.

**Tabla 7.** Presupuesto total de la obra

RUBRO	PRECIO
Costo de los materiales	4980.63
Costo de la mano de obra	7661.92
Imprevistos (5%)	632.13
<b>TOTAL</b>	<b>13274.68</b>

Al comparar el costo de la implementación de la chimenea concéntrica 13.274,68 USD., con el valor que significa detener la operación de la chimenea actual 100.000 USD diarios, por lo tanto es factible la reparación.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

1. En la inspección visual y medición de espesores por Ultrasonido se encontró que existe un alto grado de deterioro que llega hasta un 62% de pérdida de espesor.
2. En base a los parámetros que establece la Norma API 579-1 ASME FFS-1-2007, se encontró que el Tiempo de Vida Remanente en la zona más crítica de la chimenea (anillo 5) es 2 años.
3. La Inspección Basada en Riesgos es de gran utilidad porque permite identificar en que rango de riesgo se encuentra un componente o estructura y de esta forma se determinó que el nivel de riesgo de la chimenea fue Medio-Alto.
4. Con la simulación por Elementos Finitos en SAP2000 se halló que el esfuerzo máximo en la chimenea es 33.75 Kips, por lo tanto la integridad estructural de la chimenea no se ve afectada porque aún se encuentra dentro de los límites de estabilidad con relación a la resistencia del material (ASTM A36).
5. La variable que más afecta al nivel de los esfuerzos es la temperatura, un incremento de la misma aumenta considerablemente el valor de los esfuerzos.
6. Del análisis técnico se obtiene que la solución propuesta es viable y tomaría 32 días laborables implementarla sin paralizar la operación de la planta; por lo que es factible la construcción de la chimenea nueva.
7. En base al análisis económico, la implementación de la solución solo costará 13.274,68 USD, lo cual es un valor muy bajo en comparación con los 100.000 USD diarios que se perderían si la chimenea interrumpe su funcionamiento.

## Recomendaciones

1. Implementar la metodología RBI en el plan de inspecciones para aumentar la seguridad en las instalaciones y que no se produzcan fallas catastróficas.
2. Tener un registro histórico y detallado de las inspecciones y mantenimientos de la chimenea, para facilitar la aplicación de la metodología RBI.
3. Realizar la medición de espesores por ultrasonido en los mismos puntos durante las inspecciones de rutina, esto con la finalidad de obtener una mejor precisión en los valores.
4. Para el uso correcto del diseño por Elementos Finitos, se debe tener un criterio técnico adecuado, el cual se adquiere con el estudio de la Ingeniería.
5. No incrementar la temperatura de los gases de combustión del molino de coque por la afectación sobre la estructura.
6. Reforzar los anillos flotantes existentes y la construcción de uno nuevo a una mayor altura.
7. Realizar un estudio más detallado para determinar el peso y momento de volteo que resiste la cimentación.
8. Utilizar Normas Internacionales como ASCE 7-05 para el cálculo de la presión de viento sobre la chimenea, debido a que el Código Ecuatoriano de la Construcción no lo especifica.
9. Monitorear los sólidos en suspensión que están presentes en los gases de combustión, para determinar el nivel de afectación que pudiera haber en las paredes de la chimenea.
10. En el evento que se comprobare que sean partículas abrasivas que deterioren el espesor de la chimenea se deberán considerar recubrimientos resistentes a la abrasión.

- [2] American Institute of Steel Construction, Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design, Second Edition, USA, 1994.
- [3] AMERICAN WELDING SOCIETY, BRIDGE WELDING CODE AWS D1.1/D1.1M:2006
- [4] API Recommended Practice 580, Risk-based Inspection, First Edition. May 2002.
- [5] API 579-1 ASME FFS-1, Fitness for Service, 2007.
- [6] A.V. Levy, Solid Particle Erosion and Erosion-Corrosion of Materials, ASM International, Materials Park, OH, 1995.
- [7] Bosanquet et al., Dust Deposition from Chimney Stack, Proc. Ins. of Mech. Eng., Vol. 162, 1950.
- [8] CICIND, Chimney maintenance guides CICIND, January 2006.
- [9] Código Ecuatoriano de la Construcción, Peligro Sísmico, Espectros de Diseño y Requisitos Mínimos de Cálculo, 2002.
- [10] Computers and Structures, Inc., SAP2000 Linear and Non Linear, Static and Dynamic, Analysis and Design of Three Dimensional Structures, Berkeley, California, EE.UU. , 2005.
- [11] Hutton, David, Fundamentals of Finite Element Analysis; McGraw, 1era Edition, New York, 2004.
- [12] Hernández Eliud, Manual de Aplicación del Programa SAP2000 V14, Marzo 2010.
- [13] Marulanda José Luddey, Adaptación y construcción de una celda electroquímica para la evaluación de la corrosión por sales fundidas. Trabajo de investigación para optar el título de Magíster, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2000.
- [14] NACE Corrosion Engineer's Reference Book, Third Edition, 2002.
- [15] Ruiz Ocejo J., González Posada m.a., Gorrochategui i. y Gutiérrez-solana F., Presente y Futuro de los Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural de Componentes Fisurados, Anales de Mecánica de la Fractura vol.14, 1997.
- [16] Stack Corrosion, A Serious Problem Linas Mazeika, 3L&T, USA, describes the company's method for preventing and stopping corrosion in cement plant chimneys.

## 6. Referencias

- [1] Ahmed, S.H. and Zaczek, b.j., a Kinetic Study of factors influencing SO<sub>3</sub> formation in a Pre-mixed laminar flame. J.Inst. Fuel, 50-107-110 June 1977.