ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

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

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Henry Ronald Villón Barona

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2011

A G R A D E C I M I E N T O

A Dios, que siempre estuvo conmigo durante este largo camino, a todos aquellos que de alguna u otra forma ayudaron con el desarrollo de esta tesis “R” y en especial al Ing. Julián Peña E. Director de Tesis por su invaluable ayuda.

D E D I C A T O R I A

A mis padres, en especial a mis

hermanos Richard y Abraham

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gustavo Guerrero M.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Federico Camacho B.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Henry Ronald Villón Barona

RESUMEN

El estudio se enfoca en el análisis a una chimenea que se encuentra en una PLANTA CEMENTERA; esta chimenea fue construida en el año 2003 y su diseño original contemplaba la eliminación de los gases de combustión de la quema de carbón en el molino; sin embargo, se ha utilizado coque como combustible, el cual posee un mayor porcentaje de azufre. Esto ha producido una gran pérdida de espesor en este componente, lo que posteriormente podría ocasionar una paralización de uno de los procesos de la industria mencionada.

El objetivo de esta tesis fue determinar la Integridad Estructural de la chimenea usando como referencia normas tales como: Inspección Basada en Riesgo, Aptitud para el Servicio y herramientas computacionales especializadas en el análisis de esfuerzos; las herramientas se emplearon con el fin de conocer y evaluar variables o parámetros necesarios para realizar un correcto análisis de la Integridad de la estructura.

Se realizó la inspección de la estructura aplicando inspección visual, medición de espesores por medio de ultrasonido y mediciones de la temperatura real de trabajo de la chimenea.

La información de medición de espesores se la utilizó para determinar la velocidad de corrosión y el Tiempo de Vida Remanente (TVR) en cada anillo que conforma la chimenea; de esta forma se pudo conocer la zona más afectada por la corrosión, lo que permite enfocar el estudio y tomar las acciones correctivas pertinentes.

Para establecer el riesgo que representa un fallo en la estructura, se elaboró la matriz de riesgo en base a la probabilidad de que ocurra un siniestro y las consecuencias que ocasionaría el mismo.

Se planteó una alternativa de mejora para disminuir el nivel de riesgo actual de la chimenea en estudio, la cual consiste en la construcción de una chimenea concéntrica con acero ASTM A-588 hasta 18 m de altura, cuyos detalles se encuentran en los planos respectivos.

Se utilizó el programa estructural SAP2000 para determinar los esfuerzos a los cuales está sometida la chimenea (en su condición actual y con la mejora planteada). Se escogió este programa porque permite resolver cualquier sistema estructural sometido a diversos estados de cargas, además es de fácil manejo y el tiempo de solución es breve.

Se determinó que la estructura se encuentra soportando esfuerzos inferiores a la fluencia del material (ASTM A 36); sin embargo, debido a la continua pérdida de espesor, la resistencia de la chimenea en algunos anillos se ve comprometida.

La máxima velocidad de corrosión es 0,6 mm/año, la cual es considerada como alta según la Norma NACE, el TVR es 2 años y el nivel de riesgo de la estructura es Medio Alto, por lo que se recomendó realizar una mejora a mediano plazo.

Finalmente, se presentan recomendaciones para disminuir el nivel de riesgo de la chimenea y facilitar la aplicación de la Inspección Basada en Riesgo.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN…….. II

ÍNDICE GENERAL…… V

SIMBOLOGÍA……. VIII

ABREVIATURAS……... IX

ÍNDICE DE FIGURAS……... X

ÍNDICE DE TABLAS……. XII

ÍNDICE DE PLANOS…… XIV

INTRODUCCIÓN……... 1

CAPÍTULO 1

1. INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO PARA DETERMINAR LA INTEGRIDAD DE UNA ESTRUCTURA EN SERVICIO…….. 3

    1.1. Inspección Basada en Riesgo en Estructuras…….. 3

        1.1.1. Importancia de la inspección…….. 3

        1.1.2. Metodología…… 4

    1.2. Aptitud para el Servicio para el re diseño de componentes…. 9

        1.2.1. Aplicaciones y limitaciones de los procedimientos…….. 12

        1.2.2. Procedimiento de la Aptitud para el Servicio…… 13

    1.3. Conceptos sobre la Integridad Estructural como Método de Inspección……... 21

        1.3.1. Estructuras en servicio……. 22

        1.3.2. Mecanismo de fallas……. 23

1.3.3. Corrosión en la industria cementera…….. 24
1.4. Simulación basada en software como herramienta para la solución de problemas de integridad estructural…….. 36
1.4.1. Importancia de la simulación……... 36
1.4.2. Introducción al Método de Elementos Finitos…….. 38
1.4.3. Descripción de SAP2000……. 41

CAPÍTULO 2

2. INSPECCIÓN Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES……. 46
2.1. Análisis en servicio de la condición actual de la chimenea…… 46
2.1.1. Inspección Visual…….. 48
2.1.2. Medición de espesores por Ultrasonido…… 54
2.1.3 Medición de temperaturas de operación……... 61
2.2. Diseño de la matriz de riesgo…….. 64
2.3. Propuesta y detalle de la alternativa para la mejora…… 70

CAPÍTULO 3

3. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN SAP 2000……. 84
3.1. Condiciones de frontera para la simulación…….. 86
3.2. Tipos de cargas a considerar para el modelado……. 91
3.3. Escenarios de simulación propuestos…… 99
3.3.1. Condición actual…… 99
3.3.2 Alternativa de mejora…… 106
3.4 Resultados de las simulaciones…….. 109

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD…….. 117
4.1. Análisis técnico…….. 118
4.2. Análisis económico…… 124

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES……. 127

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

SIMBOLOGÍA

%	Porcentaje
Ø	Diámetro
ºC	Grados Centígrados
cm	Centímetro
D_{ft}	Dried-film thickness
F_a	Factor de aplicación
F_s	Factor de superficie
Km/h	Kilómetro por hora, unidad de velocidad
Kg	Kilogramos
Kips	Kilo pounds per square inch
Lt.	Litro, unidad de volumen
m	Metro, unidad de longitud
m²	Metro cuadrado, unidad de superficie
mm	Milímetro, unidad de longitud
mpy	Millimeter per year
t_{actual}	Espesor actual
$t_{diseño}$	Espesor de diseño
$t_{crítico}$	Espesor de crítico
µm	Micras, Rugosidad
W_{ft}	Wet-film thickness

ABREVIATURAS

AISC	American Institute Steel Construction
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
ASCE	American Society of civil engineers
ASME	American Society Mechanical Engineer
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CEC	Código Ecuatoriano de la Construcción
CSI	Computer and Structures Inc.
END	Ensayos no destructivos
FAD	Failure Assessment Diagram
FEM	Finite Element Method
FFS	Fitness for Service
GMAW	Gas Metal Arc Welding
ISO	International Standard Organization
LRFD	Load Resistance Factor Design
NACE	National Association of Corrosion Engineers
NOM	Norma Oficial Mexicana
RBI	Risk Based Inspection
SMAW	Shield Metal Arc Welding
SV	Sólidos por Volumen
TVR	Tiempo de vida remanente
USD	United States Dollars
UT	Ensayo de ultrasonido
VC	Velocidad de Corrosión
WPQ	Welding Procedure qualification
WPS	Welding Procedure specification

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Matriz de riesgo……..….....	7
Figura 1.2	Esquema de la inspección basada en riesgo……..	8
Figura 1.3	Tiempo de vida remanente desde el punto de vista de la mecánica de la fractura…..…..…..…..…..…..…..…..…..…	19
Figura 1.4	Corrosión en ambientes ácidos…..…..…..…..…..…..…...	24
Figura 1.5	Relación entre la velocidad de corrosión y la temperatura	26
Figura 1.6	Corrosión interna en una chimenea……...	29
Figura 1.7	Efecto de la temperatura del gas en la velocidad de corrosión……..……	33
Figura 1.8	Esquema de discretización de un elemento.…..……..	39
Figura 1.9	Tipos de elementos finitos.…..…….....……	40
Figura 1.10	Diseño en SAP2000.…..……..…..……...……	42
Figura 1.11	Interface de SAP2000.……	43
Figura 1.12	Resultados de esfuerzos en forma gráfica...……..……	45
Figura 2.1	Vista panorámica de la chimenea...…….....……	47
Figura 2.2	Toma de dimensión del manhole……	50
Figura 2.3	Cimentación y pernos……	51
Figura 2.4	Corrosión generalizada en la chimenea…..……	52
Figura 2.5	Corrosión localizada en la chimenea…..……	53
Figura 2.6	Medición de temperatura en la chimenea...…….….	62
Figura 2.7	Esquema de salida de los gases……..…	79
Figura 2.8	Esquema de gases encerrados……	80
Figura 3.1	Ubicación de los anillos flotantes; superior e inferior……....	88
Figura 3.2	Ducto para entrada de gases de combustión a la chimenea……	89
Figura 3.3	Anclaje de la chimenea al suelo (cimentación)……	90
Figura 3.4	Variación de la presión del viento con respecto a la altura	93

Figura 3.5	Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño……..	95
Figura 3.6	Espectro sísmico elástico calculado……..	96
Figura 3.7	Modelo geométrico dibujado en Auto-Cad con elementos 3D Face……..	100
Figura 3.8	Discretización de la chimenea en SAP2000…….	101
Figura 3.9	Asignación de secciones…….....	102
Figura 3.10	Carga de viento asignada……	103
Figura 3.11	Asignación de condiciones de frontera……	104
Figura 3.12	Esfuerzos de Von-Misses resultantes en la chimenea…...	105
Figura 3.13	Dibujo de la chimenea en Auto-Cad……	107
Figura 3.14	Chimenea discretizada en la zona de transición en SAP2000……..……...	108
Figura 3.15	Visualización de esfuerzos……..	109
Figura 3.16	Mapa de esfuerzos en la zona de descarga de los gases.	111
Figura 3.17	Esfuerzos en el anillo flotante superior…….	112
Figura 3.18	Desplazamientos en la parte superior de la chimenea…...	113
Figura 3.19	Esfuerzos en la chimenea……...	114
Figura 3.20	Distribución de esfuerzos en el anillo flotante superior…..	115
Figura 3.21	Movimiento de la chimenea en la parte superior…….....	116
Figura 3.22	Cronograma de actividades……	123

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Resumen de datos de la chimenea……..	54
Tabla 2	Espesores de diseño y de los años 2010 y 2011……..…	55
Tabla 3	Valores de velocidad de corrosión y desgaste de la chimenea, de los años 2010 y 2011……..……..…….	57
Tabla 4	Velocidades de corrosión……..……..……..…….	57
Tabla 5	Tiempo de vida remanente de la chimenea. ……..…….	60
Tabla 6	Características del termómetro infrarrojo. ……..…….	62
Tabla 7	Temperaturas de operación de la chimenea. ……..……..	63
Tabla 8	Falla por corrosión……..……..……..……..……..	65
Tabla 9	Falla por corrosión acelerada debido al uso de otros combustibles con mayor contenido de azufre……..…….	65
Tabla 10	Falla por fluencia lenta e incremento de la temperatura de los gases……..……..……..……..…….	66
Tabla 11	Falla por flexión a causa de fuerzas de viento……..……..	66
Tabla 12	Evaluación de las consecuencias de falla por corrosión…..	67
Tabla 13	Evaluación de las consecuencias de falla por corrosión acelerada……..……..……..……..…….	68
Tabla 14	Evaluación de las consecuencias de falla por termofluencia……..……..	68
Tabla 15	Evaluación de las consecuencias de falla por flexión debido a la fuerza del viento……..……..……..……..	69
Tabla 16	Matriz de riesgo de la chimenea……..……..……..	69
Tabla 17	Resumen de cargas de la cimentación……..……..…….	72
Tabla 18	Requisitos de compatibilidad del metal base y el material de aporte. ……..……..……..……..……..	75
Tabla 19	Cantidad de soldadura a utilizar……..……..……..	78
Tabla 20	Grados de limpieza superficial……..……..…….	83
Tabla 21	Cantidad de pintura a utilizar……..……..…….	83

Tabla 22	Resumen de las condiciones de frontera..……...	91
Tabla 23	Valores del factor z en función de la zona sísmica adoptada……	95
Tabla 24	Coeficiente de suelo S y coeficiente Cm……..…	96
Tabla 25	Combinaciones de carga…….	97
Tabla 26	Fortalezas y debilidades de la alternativa…….	120
Tabla 27	Presupuesto referencial de materiales…….	125
Tabla 28	Costo de mano de obra…….	125
Tabla 29	Presupuesto referencial total……..	126

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Plano general de la chimenea
Plano 2 Zona de medición de espesores
Plano 3 Chimenea concéntrica
Plano 4 Detalles de las uniones soldadas
Plano 5 Plano de construcción
Plano 6 Plano de construcción

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 determinar la integridad estructural y en el planteamiento de una solución para la reparación de una chimenea que trabaja de manera continua en una planta cementera, la estructura fue construida hace 8 años y en la actualidad presenta una gran pérdida de espesor por corrosión que afectaría el desempeño de la misma. El análisis de la Integridad se realizó sin detener la operación de la chimenea, debido a que su paralización representaría una pérdida de 100.000 USD diarios.

Se aplicaron técnicas de la Inspección Basada en Riesgo con el propósito de determinar el Tiempo de Vida Remanente (TVR) y de evaluar el nivel de riesgo de la chimenea; después usando como referencia la norma API 579-1 ASME FFS-1 2007 “Aptitud para el Servicio” y en base al nivel de riesgo encontrado, se determinó la posibilidad de que la chimenea siga operando en las condiciones actuales; además, se proponen reacondicionamientos que prolongarán su vida útil.

Para los análisis de esfuerzos en la chimenea actual y en la solución planteada se usó SAP2000.

En el primer capítulo de esta tesis, se da a conocer conceptos sobre Inspección basada en riesgo, Aptitud para el servicio, Integridad Estructural, programas de simulación y una introducción al método de elementos finitos.

En el segundo capítulo, se describe de manera detallada la forma en que se realizó la inspección técnica de la estructura en servicio, con esta información se crea la matriz de riesgo para establecer el riesgo actual de la chimenea con el fin de plantear la alternativa de mejora para aumentar su vida útil.

En el capítulo 3 se presentan las simulaciones realizadas (Condición actual y alternativa de mejora) por medio de Elementos Finitos, para determinar el valor de los esfuerzos a los que está sometida la estructura; para ello se definen las condiciones de frontera, los tipos y combinaciones de cargas a considerar para el correcto análisis de esfuerzos.

El cuarto capítulo consiste en el estudio de factibilidad de la solución propuesta, el cual está conformado de un análisis técnico y uno económico; con el análisis técnico se busca establecer las debilidades y fortalezas de la solución propuesta y con el económico el costo de la implementación de alternativa.

Finalmente, se presentan en el capítulo 5 las conclusiones y recomendaciones sobre de la integridad de la chimenea y el estudio realizado para su mejora.

CAPÍTULO 1

1. INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO PARA DETERMINAR LA INTEGRIDAD DE UNA ESTRUCTURA EN SERVICIO

1.1. Inspección Basada en Riesgo en Estructuras

1.1.1. Importancia de la Inspección

Cuando se habla de Inspección Basada en Riesgo, se debe tener en consideración que el objetivo de la misma, es encontrar toda la información necesaria acerca de una determinada estructura o equipo, para poder realizar un

adecuado análisis del riesgo en que se encuentra la estructura en mención.

La Inspección Basada en el Riesgo es importante porque sirve para identificar, evaluar y definir los riesgos en las grandes industrias (debido a la corrosión y fracturas por exceso de tensión), que pudieran poner en peligro la integridad de los equipos, tanto presurizados como estructurales, todo por medio de Ensayos No Destructivos.

1.1.2. Metodología

La inspección basada en riesgo sigue la siguiente metodología:

- Recolección de datos e información.
- Análisis del riesgo.
  - Evaluación de consecuencias.
  - Evaluación de la probabilidad de falla (veces/año).
  - Evaluación de los riesgos. (mediante matriz de riesgos).
- Revisión del plan de inspección.

Recolección de datos e información

El primer paso es la definición del sistema a inspeccionar, en el cual se incluyen: estructuras, máquinas rotatorias y otros componentes que se encuentren estandarizados en los códigos ASME.

Análisis del riesgo

Es la valoración en forma cualitativa de los riesgos, todo esto a través de la definición y evaluación de modos y causas de fallas, identificación y evaluación de las consecuencias, estimación del nivel de riesgo y la clasificación de cada componente involucrado; es decir la creación de la matriz de riesgo.

Evaluación de Consecuencias

Se realiza mediante la estimación de los costos asociados a daños al medio ambiente, sobre la salud de las personas (incluidos los trabajadores, así como las poblaciones cercanas), a equipos, socioeconómicos y pérdida de producción.

Evaluación de la Probabilidad de Falla (veces / año)

Identificando los posibles mecanismos de falla (corrosión, fatiga mecánica, fragilización, daños externos, etc.), determinando la probabilidad genérica de falla.

Evaluación de los Riesgos

El nivel de riesgo se puede establecer como el producto de la probabilidad de ocurrencia de una falla y la consecuencia de la falla (ver ecuación 1.1) y haciendo uso de la matriz de riesgo, que se presenta en la figura 1.1.

$$Riesgo = C_S x F_S$$

(Ecuación 1.1)

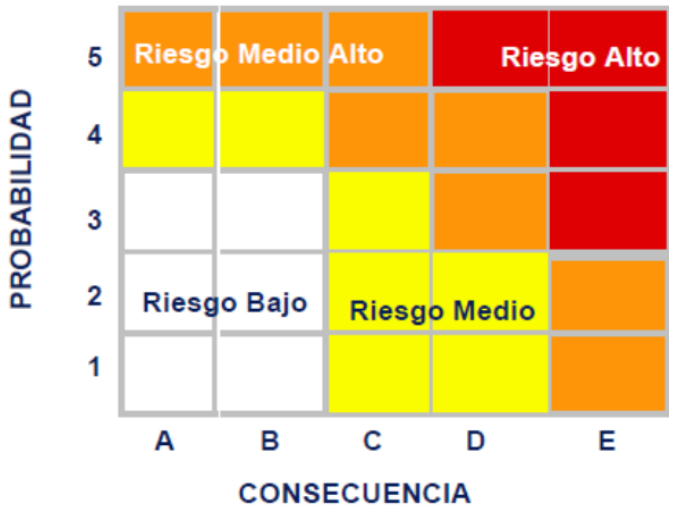


FIGURA 1.1. MATRIZ DE RIESGO. [4]

Revisión del plan de inspección

Tiene por objetivo el desarrollo del programa de inspección.

En la figura 1.2 se muestra el diagrama de flujo, en el cual se resumen los pasos mencionados anteriormente para realizar una inspección basada en riesgo.

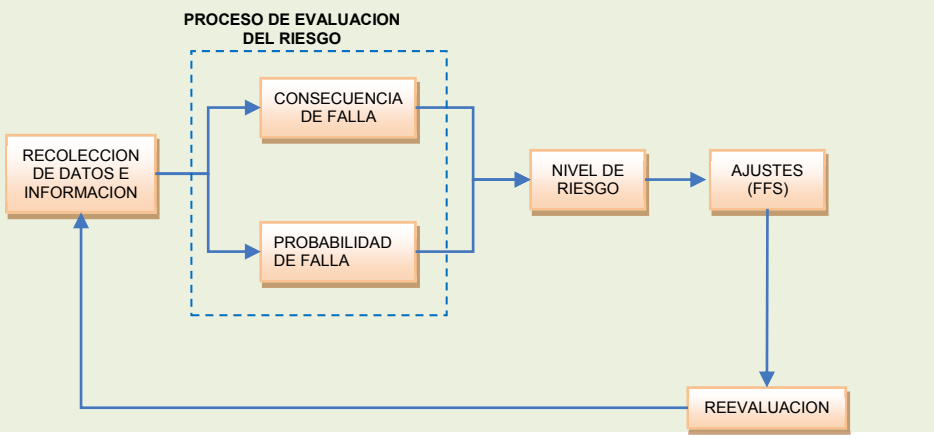


FIGURA 1.2. ESQUEMA DE LA INSPECCIÓN BASADA EN RIESGO. [4]

Niveles de la inspección

- **Nivel I.-** Herramienta de la investigación que rápidamente se pone de relieve el riesgo que los usuarios de equipos de alto riesgo tal vez desee evaluar en mayor detalle.

- **Nivel II.-** Un paso más cerca de ser un análisis cuantitativo de Nivel I, y se trata de un enfoque debajo de la escala de nivel III. Proporciona la mayor parte del beneficio del análisis Nivel III.

- **Nivel III.-** Enfoque cuantitativo del RBI que proporciona el análisis más detallado de los tres niveles.

1.2. Aptitud para el Servicio para el re diseño de componentes

La evaluación de la Aptitud para el Servicio (FFS) son valoraciones cuantitativas de la ingeniería que se realizan para demostrar la integridad estructural de un componente en servicio que puede contener una falla o daño.

Esta técnica de evaluación incluye, evaluar los defectos causados por:

- La corrosión general
- La corrosión localizada
- Daño por hidrógeno
- La desalineación de la soldadura
- Laminaciones

Además, las técnicas de evaluación se proporcionan para evaluar el estado del equipo, incluyendo la resistencia a la rotura frágil, a largo plazo daños a la fluencia, y daños por incendios.

Para realizar una evaluación de Aptitud para el servicio se requiere del aporte de múltiples disciplinas de la ingeniería, tales como:

Materiales e Ingeniería Metalúrgica.- Es una rama importante, porque permite la identificación de los mecanismos de daños que se producen en los materiales, el establecimiento de la corrosión, tasas de erosión, la determinación de las propiedades del material incluyendo los parámetros de fuerza, fisuras así como los parámetros de crecimiento de los defectos y el desarrollo de métodos que se deben seguir para realizar las correcciones adecuadas.

Ingeniería Mecánica o Estructural.- Es de ayuda para calcular el espesor mínimo requerido para que un componente y / o estructura funcione sin deformaciones plásticas.

Inspecciones Técnicas.- Establecimiento de un plan de inspección que es capaz de detectar, caracterizar, tamaño defectos o daños, y la selección y ejecución de los procedimientos de examen junto con la experiencia END disponibles.

Ingeniería Mecánica de la Fractura.- Evaluación de la grieta, así como los defectos con los principios de la mecánica de la fractura.

Ingeniería de Ensayos No Destructivos (END).- Selección y desarrollo de métodos para detectar, caracterizar y cuantificar los defectos de tamaño o la cantidad de daño, y el análisis e interpretación de los datos de la inspección.

Ingeniería de Procesos.- Permite llevar una documentación de las condiciones de funcionamiento en el pasado y el futuro, incluyendo condiciones normales de operación; la identificación del fluido y sus niveles de contaminantes que pueden afectar a la degradación del componente que se evalúa.

1.2.1. Aplicaciones y limitaciones de los procedimientos de evaluación de FFS

Los procedimientos de evaluación de FFS, se han desarrollado para evaluar los límites de presión de recipientes, componentes de calderas, tuberías, y los tanques de almacenamiento con una falla como resultado de los mecanismos de daño simple o múltiple.

En el contexto del FFS, un componente se define como cualquier parte que se ha diseñado y fabricado bajo un código reconocido, y el equipo se define como un ensamblaje de componentes.

Para los componentes que no han sido diseñados, construidos bajo los criterios del diseño original, los principios de este estándar se pueden usar para evaluar los daños en el servicio y tal como se construyó condición en relación con el diseño previsto.

Evaluaciones de FFS se llevarán a cabo por un ingeniero con conocimientos y experiencia en las disciplinas que se mencionaron anteriormente.

1.2.2. Procedimiento de la Aptitud para el Servicio

La norma API 579-1 ASME FFS-1-2007, establece el procedimiento a seguir para evaluar la Aptitud para el Servicio; una visión general del procedimiento está previsto en los siguientes ocho pasos:

PASO 1.- Identificación del error y mecanismo de daño.

El primer paso en una evaluación de Aptitud para el Servicio es identificar el tipo de fallo y la causa de los daños. Las prácticas originales de diseño y fabricación, el material de construcción, y el historial de servicio y las condiciones ambientales se pueden utilizar para determinar la causa probable de los daños.

Una vez que se identifica el tipo de falla, para su evaluación se puede seleccionar uno de los casos que se muestran en la tabla del apéndice A.

Lo cual implica la revisión de:

- Diseño.
- Procesos y ruta de fabricación.
- Propiedades y características de los materiales utilizados.
- Condiciones de operación.
- Historia de servicio anterior.

PASO 2.- Aplicabilidad y limitaciones de los procedimientos de evaluación de la Aptitud para el Servicio.

La aplicabilidad y limitaciones del procedimiento de evaluación se describen en cada sección correspondiente, y una decisión sobre si se puede proceder con una evaluación, para lo cual se requiere de programas que establezcan:

- El mecanismo de daño esperado
- Zonas de los componentes en las cuales se espera la mayor cantidad de daño
- Estándares y normas aplicables
- Límites de detectabilidad de defectos
- Intervalos de inspección

PASO 3.- Caracterización de Defectos.

La caracterización de defectos se efectúa en base a API RP-579, el cual a su vez está fundamentado en la sección XI del código ASME.

PASO 4.- Determinación de Propiedades de los Materiales.

Las más importantes para el desarrollo de la evaluación son: la Resistencia Máxima a la Tensión, la Resistencia a la Cedencia, la Tenacidad a la Fractura y la Velocidad de Crecimiento del defecto.

Los dos últimos parámetros provienen de evaluaciones de Mecánica de Fractura y deben ser determinados tomando en consideración las condiciones ambientales del proceso.

PASO 5.- Determinación de Esfuerzos.

Se deben obtener los esfuerzos aplicados, así como los residuales, de los cuales los últimos son de gran importancia para el análisis.

Estos esfuerzos pueden ser calculados de forma manual o con la ayuda de programas especializados (Análisis por Elementos Finitos).

PASO 6.- Diagrama de Evaluación de Fallas (FAD):

Con los valores de Relación de Cargas y Relación de Tenacidad y utilizando el FAD, proveniente del Código R6, se evalúa la condición actual del defecto.

PASO 7.- Cálculo del Factor de Resistencia Remanente:

Este factor debe calcularse para defectos volumétricos que no están cubiertos en el FAD, está fundamentado en análisis no lineal de esfuerzos y es definido como la relación entre la carga límite para colapso plástico del material con defectos y la equivalente para material sin defectos.

PASO 8.- Determinación de la Vida Remanente:

La cual es requerida una vez que el componente con defectos se ha mostrado seguro para la operación. La vida remanente puede calcularse empleando varios métodos disponibles, uno de los cuales es el Diagrama de Resistencia Residual empleado en el criterio de Tolerancia al Daño.

Valoración del Tiempo de Vida Remanente (TVR)

Una vez se ha establecido que el componente que contiene la falla está aceptable en el momento actual, se debe determinar el TVR para el componente, esto no significa que el TVR proporciona una estimación precisa del daño.

Por consiguiente, el TVR puede estimarse basado en la calidad de información disponible, nivel de valoración, y las asunciones apropiadas para proporcionar una seguridad adecuada para el funcionamiento hasta la próxima inspección fijada, el TVR desde el punto de vista de la mecánica de la fractura se muestra en la figura 1.3.

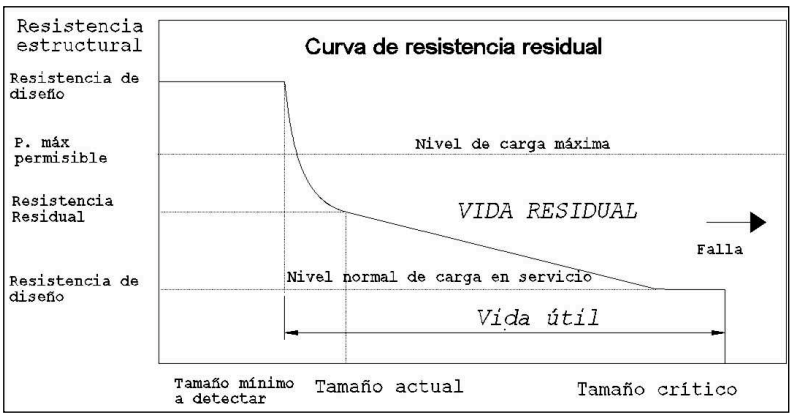


FIGURA 1.3. TIEMPO DE VIDA REMANENTE DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA. [12]

Para el cálculo del TVR, se lo puede dividir en las tres categorías siguientes:

El TVR puede calcularse con Certeza Razonable

Un ejemplo es la corrosión uniforme general dónde una concesión de corrosión futura puede calcularse y la vida restante es la concesión de corrosión futura dividida por la proporción de corrosión supuesta de los datos gruesos anteriores, como se muestra en la ecuación 1.2.

$$TVR = \frac{t_{retiro} - t_{actual}}{VC}$$

(Ecuación 1.2)

En donde:

TVR: Tiempo de Vida Remanente [años]

t_{actual}: Espesor de pared actual [mm]

$t_{crítico}$: Espesor de pared crítico [mm]

VC: Velocidad de corrosión [mpy]

La estimación de vida restante debe ser conservadora y responder a las incertidumbres en las propiedades de los materiales y variabilidad en la proporción del daño futuro.

El TVR no puede calcularse con Certeza Razonable

Un ejemplo puede ser la corrosión de tensión, es un mecanismo increíble dónde no hay datos fiables disponibles o empolladuras por hidrógeno, en donde el daño futuro no puede ser estimado.

Pequeño o ninguna TVR

En este caso se recomienda la reparación del daño que se presenta en el componente y realizar supervisiones frecuentes para su funcionamiento futuro.

1.3. Conceptos sobre la Integridad Estructural como Método de Inspección.

La Integridad estructural es utilizada para demostrar la **"idoneidad para el servicio"** de componentes y estructuras ingenieriles a lo largo de su vida operativa es decir que todo equipo de proceso sea diseñado, procurado, fabricado, construido, instalado, operado, inspeccionado, mantenido, y/o reemplazado oportunamente para prevenir fallas, accidentes o potenciales riesgos a personas, instalaciones y al ambiente, todo esto utilizando los criterios basado en datos históricos, normas y regulaciones organizacionales, nacionales e internacionales como OSHA, ASME, ANSI, ISO, API, NACE, NOM, entre otras, además de una amplia gama de disciplinas como:

- La Resistencia de Materiales
- La Mecánica de la Fractura
- Técnicas de auscultación
- Reparación de componentes estructurales

Usada correctamente, la Integridad Estructural permite optimizar diseños y procesos de fabricación, estimar la necesidad de reparaciones y por tanto evitarlas cuando no son necesarias, calcular la vida remanente de componentes estructurales y analizar fallos estructurales. De esta manera se obtiene un equilibrio entre seguridad y economía de indudables beneficios.

1.3.1. Estructuras en servicio

En una planta cementera existen una gran cantidad de estructuras tales como: molinos, secadores, chimeneas, etc.

Una chimenea industrial [8] es un dispositivo que permite la evacuación de los gases que provienen de la combustión en los hornos. También proveen

de tiro suficiente al proceso y hacen que la descarga se lleve a cabo a una altura tal que los efectos sobre las zonas de su alrededor sean mínimos.

Los flujos de gases expulsados por la chimenea consisten en aire caliente, agua y sustancias agresivas en su mayor parte. Las temperaturas varían de fría 30º C a caliente 900º C y muy caliente hasta 1100º C.

1.3.2. Mecanismo de fallas

Las chimeneas pueden presentar diferentes tipos de fallas a lo largo de su operación, entre los cuales tenemos:

- Ataque químico (corrosión por el ácido)
- Altas temperaturas
- Cambio de estas temperaturas (estrés térmico)
- Explosiones o aumento de presión
- Cambios en las condiciones de operación

- Mucho tiempo de operación en continuo
- Efectos del viento
- Movimientos de tierra (Sismos)

1.3.3. Corrosión en la industria cementera

La corrosión en general implica el deterioro o la destrucción de material, por lo general un metal, por reacción con su medio ambiente. Corrosión en el normal sentido implica la pérdida de electrones del metal para el medio ambiente y la formación de productos de corrosión tales como los óxidos, como se muestra en la figura 1.4.

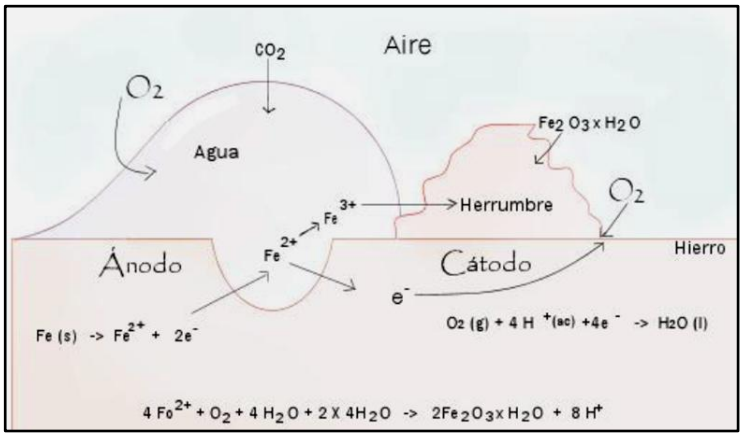


FIGURA 1.4. CORROSIÓN EN AMBIENTES ÁCIDOS [16]

Las graves consecuencias del proceso de corrosión en plantas de cemento se han convertido en un problema de importancia en todo el mundo.

La corrosión hace que las plantas cierren, se desperdicien recursos valiosos, pérdida o contaminación de producto, reducción en la eficiencia, poner en peligro la seguridad.

Los daños por corrosión son caros y es un tema muy importante en las plantas de cemento. Es bien sabido que el acero al carbono se corroe rápidamente cuando está expuesto al calor, gases ácidos y gases condensación producida en una planta de cemento.

Para entender sobre la corrosión en la industria cementera, es conveniente dividirla en dos zonas:

- Zona de alta temperatura
- Zona de baja temperatura

Tal como se muestra en la figura 1.5.

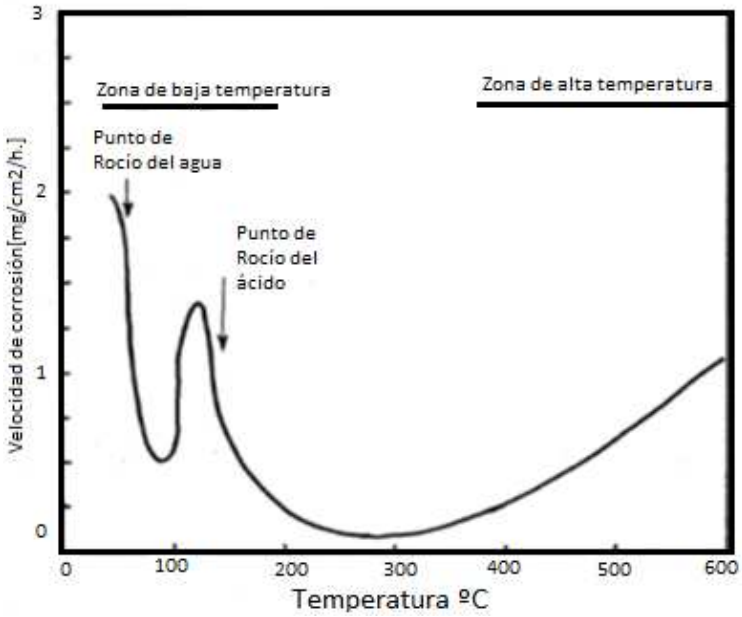


FIGURA 1.5. RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN Y LA TEMPERATURA. [1]

La corrosión de las superficies que funcionan por encima de la temperatura en los componentes de la ceniza tiende a convertirse en líquido (a unos 600 °C o por encima). La corrosión de los equipos que operan por debajo del punto de rocío ácido de los gases (aproximadamente 150 ° C) es llamada corrosión a baja temperatura.

La corrosión es cada vez más grave cuando hay una mayor presencia de compuestos ácidos en los gases de combustión (La corrosión se acelera).
El origen de estos compuestos ácidos es el mayor contenido de azufre en el combustible a ser quemado, con lo que se produce una mayor cantidad de SO_2 y SO_3.

Los combustibles como el carbón, coque de petróleo con un alto contenido de azufre son muy comunes debido a que son más económicos y la cantidad de azufre puede estar en un rango de 4-7%.

Una de las causas que incrementa la corrosión en las plantas cementeras es el aumento en el uso de combustibles residuales. Las plantas de cemento son las que queman más combustibles residuales como una forma de reducir los costos del combustible y en algunos casos como una fuente adicional de ingresos.

En muchos casos, este tipo de residuos es una fuente de cloruros adicionales. La combinación de azufre y cloruros tiende a acelerar la corrosión del acero.

Además el exceso de humedad en el ambiente produce una disminución en la temperatura en las paredes de la chimenea, con lo que se produce condensación de ácido: ésta condensación en la mayoría de los casos es intermitente por períodos de tiempo muy cortos, pero este efecto es acumulativo (puede ser de hasta 1,0 mm / año) y a medida que el espesor de la capa oxido aumenta, con el tiempo las escamas de corrosión se desprenden de la superficie del metal al evacuar los gases de combustión, en la figura 1.6 se muestra la forma de la corrosión interna típica que se presenta en una chimenea.

FIGURA 1.6. CORROSIÓN INTERNA EN UNA CHIMENEA. [16]

Los mecanismos de corrosión más comunes en la industria cementera son:

- Corrosión por CO_2
- Corrosión por SO_2
- Corrosión a altas temperaturas
- Corrosión por erosión

Corrosión por CO_2

La corrosión del acero en ambientes de CO_2, dependiendo de la formación y las características de las escalas de carbonato de hierro, se puede clasificar en corrosión general y corrosión

localizada. En los rangos de temperatura baja (<60 ° C) no se forman películas protectoras en la superficie debido a la alta solubilidad del carbonato de hierro y, por tanto, domina la general de la corrosión.

A temperaturas y por encima de 80°C la solubilidad del $FeCO_3$ disminuye considerablemente y la sobresaturación conduce a la precipitación del $FeCO_3$ y películas de hierro muy densa y protectora de carbonato de forma posible.

Cuando se habla de la protectividad de las escalas de carbonato de hierro, también debe ser considerada la cinética de la precipitación del carbonato de hierro.

La corrosión General y localizada de CO_2 está influenciada por una serie de factores que pueden dividirse en los relacionados con la interfaz, los parámetros relacionados con los materiales y relacionados con el medio.

Los parámetros relacionados con la interfaz incluyen:

- La temperatura
- El caudal
- La condensación
- La presencia de escamas

Entre los parámetros relacionados con los materiales tenemos:

- Composición de aleación
- Tratamiento térmico
- Microestructura.

Y entre los parámetros relacionados con el medio tenemos:

- La influencia del pH
- La presión parcial de CO_2
- Química de las soluciones
- La presencia de oxígeno

Todos los parámetros mencionados anteriormente son interdependientes e influyen en la corrosión por CO_2 y de diferentes maneras.

Corrosión por SO_2

El aumento de la eficiencia en el diseño de los dispositivos de transferencia de calor en sistemas de combustión se ha traducido en la disminución de la temperatura del gas de combustión.

Algunos combustibles, entre ellos el carbón, petróleo y gas, pueden contener hasta un 4% de azufre, un gran parte del mismo se oxida durante el proceso de combustión, para formar SO_2; un porcentaje más pequeño se oxida, en presencia de un exceso de aire formando SO_3.

Los gases de los procesos de combustión al entrar en contacto con superficies que se encuentran a una temperatura comprendida entre la del vapor de agua y el punto de rocío ácido (en la que se produce condensación de punto), se forma una película de ácido sulfúrico.

Mientras que el punto de rocío ácido sulfúrico es aproximadamente unos 132ºC, la máxima velocidad de corrosión en el acero de la chimenea se produce a unos 110ºC, como se muestra en la figura 1.7, donde se ilustra el potencial de corrosión de los gases de combustión.

Éste punto de rocío del ácido (condensación del ácido) depende principalmente de la cantidad de aire, la temperatura del proceso de combustión y el contenido de azufre en el combustible.

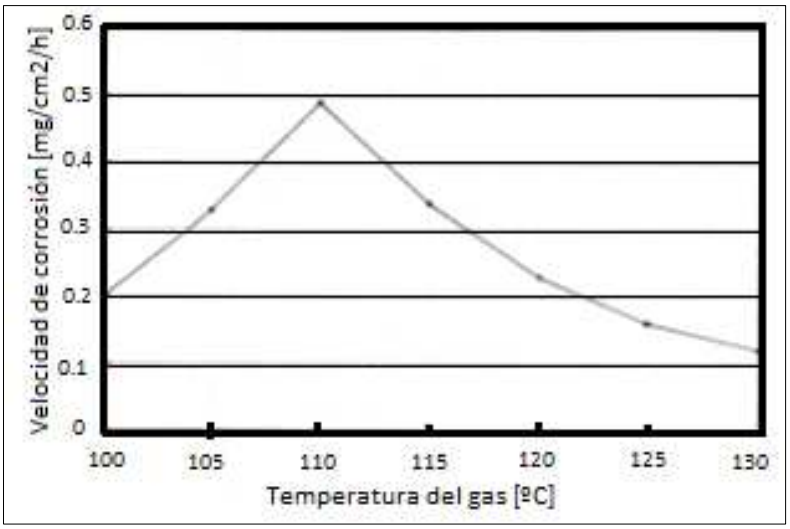


FIGURA 1.7. EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL GAS EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN. [7]

Corrosión a altas temperaturas

Es la degradación u oxidación acelerada de metales y aleaciones por un depósito de una película delgada de sal fundida en presencia de un ambiente oxidante a elevada temperatura.

Debido a la severidad de este tipo de ataque, se puede producir una falla catastrófica del elemento sometido a éste; se ha visto que este tipo de ataque está relacionado con un número de variables como son:

- la composición del depósito de sal
- la atmósfera o ambiente
- temperatura y ciclo de temperatura
- composición de la aleación o material
- microestructura de la aleación.

La corrosión a altas temperaturas en materiales que operan bajo condiciones severas de trabajo, da como resultado una velocidad de corrosión a elevada temperatura dependiendo de los

siguientes factores: la composición química del depósito, que es función del contenido de contaminantes en el combustible y de la calidad de combustión, el tipo de material empleado en el proceso de fabricación del tubo, la temperatura de los gases de combustión y la temperatura de la superficie metálica.

Corrosión por erosión

Cualquier sistema operativo que utiliza la industria de gas a temperatura elevada flujos que contienen pequeñas partículas sólidas es susceptible a la erosión combinada, a la corrosión. Estos sistemas se presentan en muchas industrias, entre ellas están la generación de electricidad, la incineración de residuos, la refinación de petróleo, procesos químicos, fabricación de cemento, y el transporte a granel.

Es la aceleración o aumento de la tasa de deterioro o ataque a un metal debido al movimiento relativo entre un medio corrosivo y la superficie del metal.

En general, el movimiento es rápido y los efectos del desgaste o abrasión mecánica están involucrados. El metal es removido de la superficie como disuelto iones o productos de corrosión son mecánicamente barrido de la superficie del metal.

1.4. Simulación basada en software como herramienta para la solución de problemas de integridad estructural

1.4.1. Importancia de la simulación

Los programas especializados para realizar simulaciones tienen un rol muy importante, para establecer la integridad estructural de los componentes mecánicos.

Con la ayuda de estos programas se pueden establecer los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los equipos y/o estructuras, de esta forma se logra crear un Mapa de Tensiones de las zonas críticas para evaluar la Integridad del componente; y en casos de riesgo o daño, elaborar las contramedidas necesarias, ya sean correctivas o preventivas.

El proceso de análisis básico que utilizan estos programas consta de:

- Creación del modelo
- Asignación de cargas
- Asignar las condiciones de frontera
- Cálculo (Solución de ecuaciones)
- Análisis de resultados

En el mercado existen una gran variedad de programas especializados para el cálculo de esfuerzos, cada uno con características propias; es decir algunos son especializados en estructuras, fluidos, elementos mecánicos, propagación de fracturas, transferencia de calor etc.

Entre los programas de simulación más conocidos a nivel mundial podemos nombrar los siguientes:

- ABAQUS
- ANSYS
- SAP 2000
- ALGOR

De los programas mencionados anteriormente se seleccionará SAP2000, ya que lo que se simulará es una estructura y este programa es uno de los mejores para dicha utilización.

1.4.2. Introducción al Método de elementos finitos

El método de elementos finitos, es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería que involucran un gran grado de complejidad que por lo general no es posible obtener alguna solución directamente de expresiones matemáticas.

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido mucha importancia en la solución de problemas complejos de ingeniería.

El análisis por medio de Elementos Finitos consiste en subdividir todos los sistemas en un

conjunto de elementos pequeños cuyo comportamiento es de fácil comprensión y que se encuentran interconectados por medio de nodos, como se muestra en la figura 1.8; y a continuación, reconstruir el sistema original a partir de estos elementos continuos.

El modelo matemático “discretizado” que se crea permite simular lo que sucede con el sistema real al aplicarle cargas, e identificar las áreas críticas.

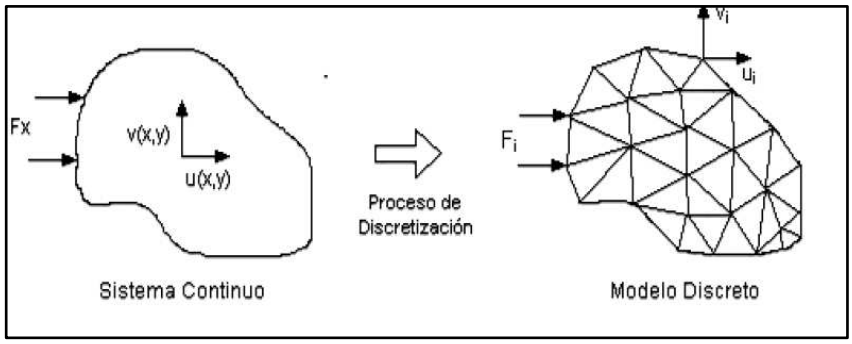


FIGURA 1.8. ESQUEMA DE DISCRETIZACIÓN DE UN ELEMENTO. [11]

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento.

Existen varios tipos de elementos finitos (ver figura 1.9):

- Elemento tipo barra
- Elemento tipo resorte
- Triangulo de tres nodos
- Triangulo de 6 nodos
- Cuadriláteros de 4 nodos

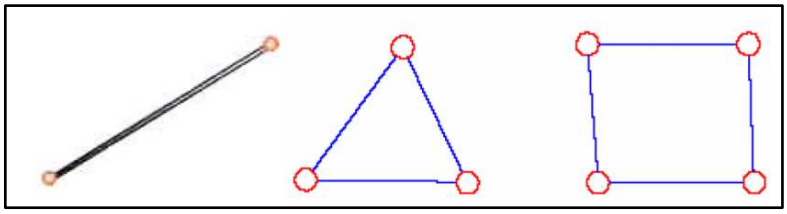


FIGURA 1.9. TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS [11]

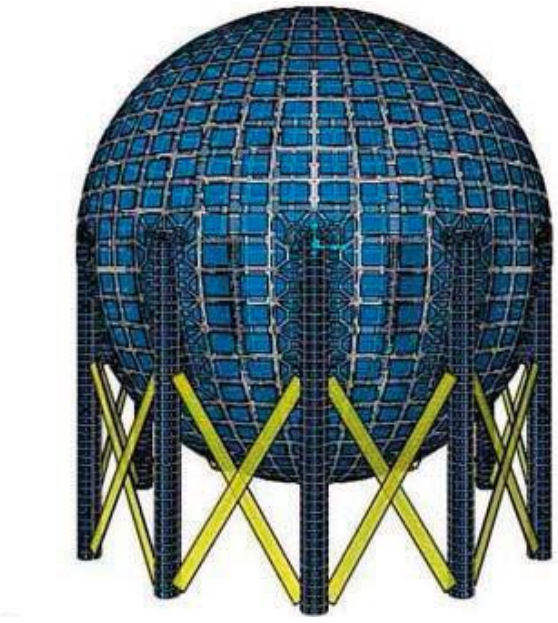
(a) BARRA, (b) TRIANGULAR, (c) CUADRILÁTERO.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo, porque se utilizan muchas hipótesis para aplicar el método.

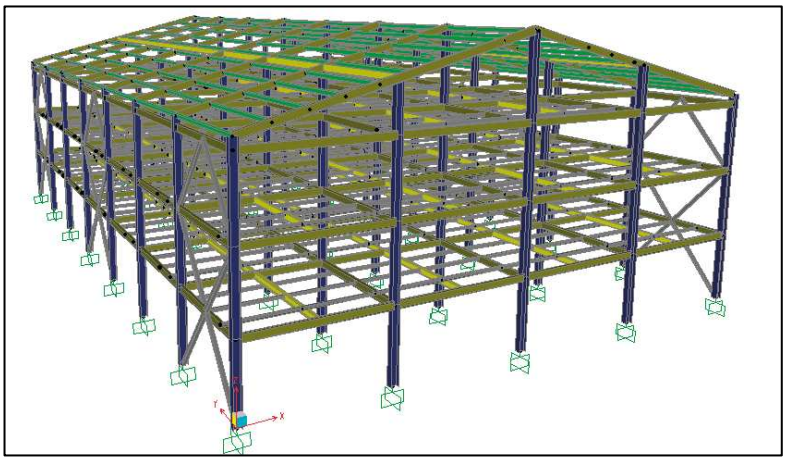
1.4.3. Descripción de SAP2000

SAP2000 es un programa sofisticado y de fácil manejo desarrollado por CSI (Computer and Structures Inc.).

Este es un software muy utilizado para el cálculo de estructuras, tales como torres, puentes, edificios metálicos, recipientes a presión, análisis de soldaduras, etc. (ver figura 1.10).



(a) RECIPIENTE A PRESIÓN



(b) ESTRUCTURA METÁLICA

FIGURA 1.10. DISEÑO EN SAP2000. [12]

Todo esto mediante elementos finitos lineales y superficiales; lo cual básicamente es dividir el elemento en cuestión en partes pequeñas las cuales poseen las siguientes características:

- Geometría: **sistema de referencia.**
- Material: **ley constitutiva.**
- Condiciones de frontera esenciales: **apoyos.**
- Condiciones de fronteras naturales: **cargas.**

Estos elementos finitos lineales y superficiales permiten la resolución de problemas en dos y tres dimensiones respectivamente.

SAP2000 presenta una interface muy amigable con el usuario, donde es posible crear, modificar, ejecutar el análisis, revisar los resultados y optimizar el modelo en estudio.

En la figura 1.11 se muestra la interface del programa.

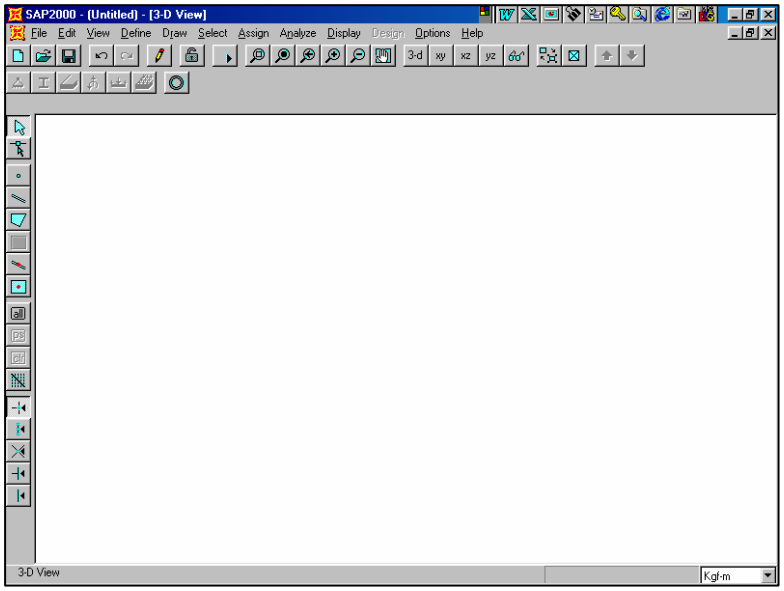


FIGURA 1.11. INTERFACE DE SAP2000

Posee una rápida solución de ecuaciones, esfuerzos y desplazamientos inducidos por cargas, elemento frame (vigas, columnas) de sección no prismática, elemento Shell (membrana) muy exactos, análisis dinámicos y múltiples sistemas de coordenadas.

En lo referente a la creación de modelos SAP2000 posee un conjunto de plantillas básicas, que son de gran utilidad para generar estos modelos de forma rápida, sencilla y eficiente.

También se pueden crear modelos con geometrías muy complejas, ofrece la facilidad de fusionar mallas de elementos independientes, en las cuales se pueden definir diferentes estados de cargas, también permite generar pesos propios, asignar secciones, materiales, así como realizar cálculos de acero basado de acuerdo a varias normas internacionales como: AISC, EUROCODE, etc.; todo esto porque posee un módulo completo de diseño para acero y concreto reforzado, basado en normas internacionales mencionadas anteriormente.

El proceso de análisis es sencillo y consta de:

- Relevamiento
- Modelado Geométrico de la estructura
- Aplicación de cargas

- Condiciones de Operación
- Cálculo (Solución de ecuaciones)
- Análisis de resultados.

Los resultados se muestran de una forma gráfica y en tiempo real. (Ver figura 1.12).

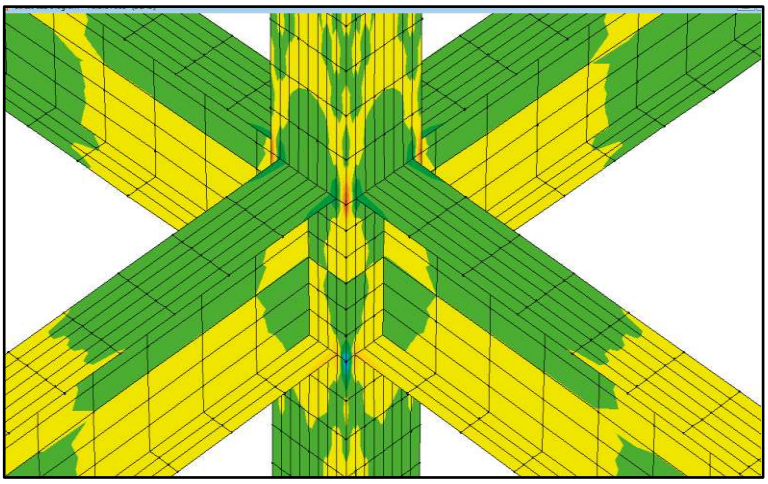


FIGURA 1.12. RESULTADOS DE ESFUERZOS EN FORMA GRÁFICA. [12]

CAPÍTULO 2

2. INSPECCIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

2.1. Análisis en servicio de la condición actual de la chimenea

Debido a que la chimenea ha tenido una gran pérdida de espesor (de 8 mm de espesor inicial a 3 mm de espesor actual aproximadamente) durante un tiempo de 8 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 2.1).

FIGURA 2.1. 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

Con los datos obtenidos de las inspecciones anteriores se realizará simulaciones, las que se muestran el capítulo 3.

2.1.1. Inspección visual

El primer paso a seguir para la evaluación de la chimenea es realizar una inspección visual.

Se recomienda la aplicación de este método porque permite detectar y dimensionar defectos en la superficie exterior de la pared de la chimenea, además permite determinar cómo está conformada la chimenea, es decir toda su geometría, dimensiones, etc.

A continuación, se muestran las dimensiones y algunas de las partes que conforman la estructura.

- **Descripción de la chimenea**

  La chimenea consta de 25 niveles de 2000 mm de altura cada uno, constituidos por planchas metálicas roladas para formar un cilindro de 1400 mm de diámetro exterior y 50 m de altura total de la estructura. (Ver plano 01)

  A una altura comprendida entre 3,78 m y 6,78 m sobre el nivel del inicio de la estructura, se encuentra un ducto rectangular chaflanado por donde ingresan los gases de molienda de coque.

  Adicionalmente la chimenea posee dos anillos flotantes: a 17,9 m el primero y a 29,5 m el segundo, ambos con una viga pivotante cuya función es evitar la deflexión excesiva debido a la acción del viento.

  La chimenea posee un manhole de 90 cm de diámetro, como se muestra en la figura 2.2; el cual sirve para la limpieza de los residuos de los gases de combustión.

FIGURA 2.2. TOMA DE DIMENSIÓN DEL MANHOLE

La chimenea está apoyada sobre una cimentación de hormigón armado de sección circular, de 1.9 m de diámetro, a la cual se encuentra anclada con 21 pernos de ¾", como se muestra en la figura 2.3.

FIGURA 2.3. CIMENTACIÓN Y PERNOS

- **Resultados de la Inspección visual**

  Mediante la inspección visual se observó corrosión generalizada en toda la chimenea (ver figura 2.4).

FIGURA 2.4. CORROSIÓN GENERALIZADA EN LA CHIMENEA

Este fenómeno de corrosión se presenta debido a que las superficies de la chimenea se encuentran expuestas a un ambiente corrosivo industrial y no existe protección externa para evitarla.

En algunas partes de la chimenea, el problema de la corrosión se encuentra en un estado más avanzado, éste es el caso que se presenta en el anillo 17 (aproximadamente a 34 m de altura), donde se observa una corrosión localizada, lo que ha producido una perforación en la chimenea, esta perforación es de aproximadamente 2 cm de diámetro, como se muestra en la figura 2.5.

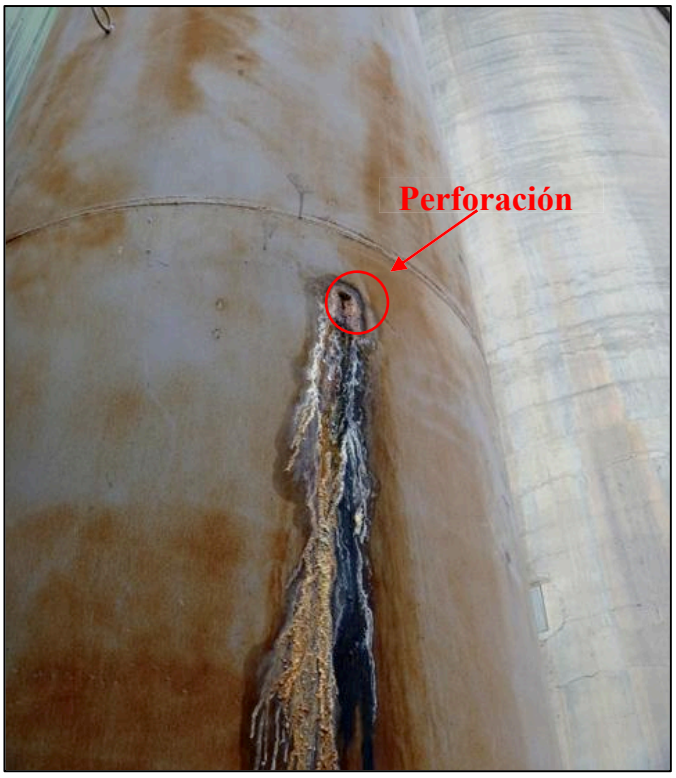


FIGURA 2.5. CORROSIÓN LOCALIZADA EN LA CHIMENEA

En la siguiente tabla se resumen datos importantes de la chimenea.

TABLA 1

RESUMEN DE DATOS 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"

2.1.2. Medición de espesores por Ultrasonido

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.

Los espesores fueron medidos en cuatro puntos del perímetro de cada anillo, como se muestra en el plano 02.

En la tabla 2 se muestran los espesores obtenidos en el ensayo, estas mediciones corresponden al espesor inicial (2003) y a los años 2010 y 2011 respectivamente.

TABLA 2

ESPESORES DE DISEÑO Y DE LOS AÑOS 2010 Y 2011

Anillo No:	AÑO 2003	AÑO 2010		AÑO 2011	
	Espesor de Diseño [mm]	Espesor promedio 2010 [mm]	Espesor menor 2010 [mm]	Espesor promedio 2011 [mm]	Espesor menor 2011 [mm]
1	8	7.4	6.9	6.7	6.4
2	8	7.0	6.2	5.5	4.9
3	8	5.5	4.0	4.4	3.2
4	8	4.9	3.6	4.6	3.8
5	8	3.8	3.5	3.8	2.4
6	8	4.0	3.3	3.4	2.9
7	8	3.4	2.7	3.5	3.0
8	8	3.7	3.2	3.8	3.3
9	8	3.8	3.3	3.8	3.0
10	8	4.0	3.5	3.7	3.2
11	6	3.6	3.0	3.9	3.3
12	6	3.7	3.4	4.3	4.0
13	6	4.1	3.7	4.4	4.0
14	6	3.9	3.6	4.4	4.2
15	6	3.8	3.4	4.6	4.0
16	6	4.1	3.8	4.8	4.4
17	6	4.6	4.2	4.5	3.9
18	6	4.4	4.1	4.9	4.7
19	6	4.2	3.9	4.7	4.1
20	6	4.0	3.0	4.5	4.0
21	6	4.1	3.4	4.7	4.0
22	6	4.3	4.1	4.3	3.9
23	6	4.4	4.0	4.4	3.0
24	6	-	-	4.2	3.2
25	6	-	-	3.5	2.9

Los datos anteriores permiten determinar la velocidad de corrosión y desgaste que ha sufrido

la estructura, para el cálculo se utilizarán las ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente.

$$VC = \frac{t_{diseño} - t_{actual}}{T}$$

(Ecuación 2.1)

$$\%Desgaste = \frac{t_{diseño} - t_{actual}}{t_{diseño}}$$

(Ecuación 2.2)

En donde:

$\boldsymbol{VC}$: Velocidad de corrosión [mm/año]

$\%\boldsymbol{Desgaste}$: Porcentaje de desgaste

$\boldsymbol{t_{diseño}}$: Espesor de diseño de la pared [mm]

$\boldsymbol{t_{actual}}$: Espesor actual de la pared [mm]

Los resultados de la velocidad de corrosión y desgaste se muestran en la tabla 3, en la cual se observa con color rojo los valores de VC mayores a medio milímetro por año, porque son considerados críticos según la Norma NACE, como se muestra en la tabla 4.

TABLA 3

VALORES DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN Y DESGASTE DE LA CHIMENEA, DE LOS AÑOS 2010 Y 2011

Anillo No:	AÑO 2003	AÑO 2010			AÑO 2011		
	Espesor de Diseño [mm]	Espesor menor 2010 [mm]	Tasa de corrosion [mpy]	Desgaste [%]	Espesor menor 2011 [mm]	Tasa de corrosion [mpy]	Desgaste [%]
1	8	6.9	0.2	13.8	6.4	0.2	20.0
2	8	6.2	0.3	22.5	4.9	0.4	38.8
3	8	4.0	0.6	50.0	3.2	0.6	60.0
4	8	3.6	0.6	55.0	3.8	0.5	52.5
5	8	3.5	0.6	56.3	2.4	0.7	70.0
6	8	3.3	0.7	58.8	2.9	0.6	63.8
7	8	2.7	0.8	66.3	3.0	0.6	62.5
8	8	3.2	0.7	60.0	3.3	0.6	58.8
9	8	3.3	0.7	58.8	3.0	0.6	62.5
10	8	3.5	0.6	56.3	3.2	0.6	60.0
11	6	3.0	0.4	50.0	3.3	0.3	45.0
12	6	3.4	0.4	43.3	4.0	0.3	33.3
13	6	3.7	0.3	38.3	4.0	0.3	33.3
14	6	3.6	0.3	40.0	4.2	0.2	30.0
15	6	3.4	0.4	43.3	4.0	0.3	33.3
16	6	3.8	0.3	36.7	4.4	0.2	26.7
17	6	4.2	0.3	30.0	3.9	0.3	35.0
18	6	4.1	0.3	31.7	4.7	0.2	21.7
19	6	3.9	0.3	35.0	4.1	0.2	31.7
20	6	3.0	0.4	50.0	4.0	0.3	33.3
21	6	3.4	0.4	43.3	4.0	0.3	33.3
22	6	4.1	0.3	31.7	3.9	0.3	35.0
23	6	4.0	0.3	33.3	3.0	0.4	50.0
24	6	-	-	-	3.2	0.4	46.7
25	6	-	-	-	2.9	0.4	51.7

TABLA 4
VELOCIDADES DE CORROSIÓN. [14]

	Velocidad de corrosión [mm/año]
Baja	<0,025
Moderada	0,025-0,12
Alta	0,13-0,25

Analizando los resultados que se muestran en la tabla 3, se observa que la medición de espesores (UT) presenta valores que se consideran críticos, debido a que existen planchas con valores que han sobrepasado el 50% de desgaste del material. Esto ocurre en las planchas comprendidas entre los anillos 3 y 11, las cuales tenían un espesor inicial de 8 mm y que actualmente se encuentran operando con espesores que varían entre 3,0 y 2,4 mm.

Tiempo de Vida Remanente (TVR)

Es el lapso de tiempo que transcurre desde que un defecto es detectado y analizado en su severidad, hasta que alcanza el tamaño crítico, que es el tamaño que produce una fuga o falla. Si el TVR es mayor que el tiempo esperado de servicio o el periodo de la próxima inspección no hay riesgo de falla, pero si TVR es menor que el tiempo esperado de servicio o el periodo de la próxima inspección integral, el defecto debe repararse.

Si la reparación no es posible de realizar de inmediato, el TVR puede emplearse para establecer el plazo de la siguiente inspección. Si el TVR es menor de 6 meses, deberá tomarse una acción correctiva inmediata.

Utilizando la ecuación 1.2, se obtiene el TVR de la chimenea.

En un estudio preliminar de análisis de esfuerzos que se muestra en el apéndice B se obtuvo que el espesor crítico es 1 mm; es decir el espesor en el cual se presentan la mayor cantidad deformaciones plásticas.

En base al espesor crítico procedió a calcular el TVR cuyos resultados se muestran la tabla 5.

TABLA 5

TIEMPO DE VIDA REMANENTE DE LA CHIMENEA.

Anillo No:	AÑO 2003	AÑO 2011			Tiempo de Vida Remanente [años]
	Espesor de Diseño [mm]	Espesor menor 2011 [mm]	Tasa de corrosion [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 5, 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.

2.1.3. Medición de temperaturas

Mediante información proporcionada por el personal del cuarto de control de la empresa, se conoce que la temperatura de salida del molino de coque oscila entre 75°C y 85°C mostrando valores picos de 90°C sostenidos por un tiempo máximo de 15 minutos.

El tiempo de operación de la chimenea es continuo, es decir trabaja 24 horas al día y 7 días a la semana.

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, para lo cual se utilizó un termómetro infrarrojo; las características del instrumento de medición se muestran en la tabla 6 y en la figura 2.6 se ilustra la forma en se realizaron dichas mediciones.

TABLA 6

CARACTERÍSTICAS DEL TERMÓMETRO INFRARROJO.

Marca:	Cole Parmer
Serie:	39650-04
Apreciación:	± 2 ºF
Rango de medida:	.-25 a 932ºF

FIGURA 2.6. MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN LA CHIMENEA

El resultado de la medición de las temperaturas reales de trabajo a las que se encuentra sometida la chimenea se muestra en la tabla 7.

TABLA 7

TEMPERATURAS DE OPERACIÓN DE LA CHIMENEA.

Anillo No:	Temperatura de operacion [ºC]
1	29
2	30
3	59
4	58
5	58
6	57
7	57
8	56
9	56
10	55
11	55
12	54
13	54
14	54
15	53
16	53
17	52
18	51
19	51
20	50
21	50
22	50
23	50
24	50
25	50

Con las mediciones realizadas, se obtuvo que la temperatura más alta es de 60ºC 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 ºC en la parte más alta de la chimenea (50 m.)

2.2. Diseño de la matriz de riesgo

Para crear la matriz de riesgo se deben establecer las probabilidades de fallas así como las consecuencias de las fallas.

Probabilidades de fallas

Se identificaron los factores de riesgo que afectan las chimeneas, los cuales 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

Las probabilidades serán evaluadas de la siguiente forma:

- Imposible (casi) <0,1%
- Improbable 0,1% - 1%
- Posible 1%-10%
- Probable 10% - 80%
- Cierto (casi) 80% - 100%

A continuación se van a evaluar las probabilidades de que la chimenea sufra una falla.

TABLA 8

FALLA POR CORROSIÓN

Rango	Descripción
Imposible (casi)	Excelente material, ambiente poco corrosivo y con protección
Improbable	Excelente material y ambiente corrosivo
Posible	Acero común, ambiente corrosivo
Probable	Un acero común, ambiente corrosivo y sin protección
Cierto (casi)	Un acero común, ambiente altamente corrosivo y sin protección

TABLA 9

FALLA POR CORROSIÓN ACELERADA DEBIDO AL USO DE OTROS COMBUSTIBLES CON MAYOR CONTENIDO DE AZUFRE

Rango	Descripción
Imposible (casi)	Contenido de azufre menor 0.5%
Improbable	Contenido de azufre entre 0.5%-2%
Posible	Contenido de azufre entre 2%-4%
Probable	Contenido de azufre entre 4%-6%
Cierto (casi)	Contenido de azufre entre > 7%

TABLA 10

FALLA POR FLUENCIA LENTA E INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES

Rango	Descripción
Imposible (casi)	No hay incremento de la temperatura
Improbable	Incremento de 60ºC a 70ºC
Posible	Incremento de 70ºC a 80ºC
Probable	Incremento de 80ºC a 120 ºC
Cierto (casi)	Incremento a >120 ºC

TABLA 11

FALLA POR FLEXIÓN A CAUSA DE FUERZAS DE VIENTO

Rango	Descripción
Imposible (casi)	Velocidad del viento menor a 100 Km/h
Improbable	Velocidad del viento entre 100-120 Km/h
Posible	Velocidad del viento entre 120-140 Km/h
Probable	Velocidad del viento entre 140-160 Km/h
Cierto (casi)	Velocidad del viento mayor a 160 Km/h

Consecuencia de fallas

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

Estas consecuencias fueron evaluadas en un rango de 0-4, donde 0 representa una consecuencia despreciable y 4 la más representativa o alta.

A continuación se muestra, como fueron evaluadas las consecuencias.

TABLA 12

EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE FALLA POR CORROSIÓN

Corrosión Probabilidad= 1	
	CONSECUENCIA
DAÑOS AL PERSONAL	3
DAÑOS A ÁREAS CERCANAS	1
DAÑOS SOBRE LAS INSTALACIONES	2
DAÑOS SOBRE LA PRODUCCIÓN	1
DAÑOS SOBRE EL MEDIO	3
PROMEDIO	**2**

TABLA 13

EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE FALLA POR CORROSIÓN ACELERADA

Corrosión acelerada debido al uso de otros combustibles con mayor contenido de azufre, Probabilidad=3	
	CONSECUENCIA
DAÑOS AL PERSONAL	3
DAÑOS A ÁREAS CERCANAS	1
DAÑOS SOBRE LAS INSTALACIONES	3
DAÑOS SOBRE LA PRODUCCIÓN	1
DAÑOS SOBRE EL MEDIO	3
PROMEDIO	**2**

TABLA 14

EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE FALLA POR TERMOFLUENCIA

Daños por fluencia lenta e incremento de la temperatura de los gases Probabilidad=4	
	CONSECUENCIA
DAÑOS AL PERSONAL	2
DAÑOS A ÁREAS CERCANAS	1
DAÑOS SOBRE LAS INSTALACIONES	3
DAÑOS SOBRE LA PRODUCCIÓN	1
DAÑOS SOBRE EL MEDIO	1
PROMEDIO	**2**

TABLA 15
EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE FALLA POR FLEXIÓN DEBIDO A LA FUERZA DEL VIENTO

Fallas por flexión a causa de fuerzas de viento Probabilidad=3	
	CONSECUENCIA
DAÑOS AL PERSONAL	2
DAÑOS A ÁREAS CERCANAS	1
DAÑOS SOBRE LAS INSTALACIONES	2
DAÑOS SOBRE LA PRODUCCIÓN	3
DAÑOS SOBRE EL MEDIO	3
PROMEDIO	**2**

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 16
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

En base a la matriz de riesgo obtenida y al Tiempo de Vida Remanente (TVR), se identifica que la chimenea se encuentra en un nivel de riesgo medio-alto y se deben realizar adecuaciones a la estructura a corto plazo, en caso contrario se incrementará su criticidad lo que podría producir un fallo catastrófico de la estructura. Sin embargo, para poder evaluar la integridad estructural de la chimenea es necesario realizar una simulación para analizar la condición de la estructura y su capacidad de resistir esfuerzos.

2.3. Propuesta y detalle de la alternativa para la mejora

Se propone la construcción de una chimenea concéntrica, para mejorar la integridad estructural de la chimenea en estudio.

Construcción de una chimenea concéntrica

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 (anillo flotante inferior), porque es la zona más afectada por la corrosión. (Ver plano 03).

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.

El espesor de las planchas que conforman el encamisado debe ser de 5 mm; el espesor recomendado fue calculado haciendo una relación entre la carga que soportaba la cimentación cuando se construyó la chimenea (11.7 Ton. aproximadamente) y la carga que se añadirá con la nueva estructura; de ésta manera se pretende no exceder ese valor con la construcción del encamisado.

Con la colocación del encamisado se llega a un valor de 9.7 Ton como se muestra en la tabla 17 (en el apéndice C se muestran las tablas con más detalle); para tener una mayor precisión se debe realizar un análisis más minucioso de la cimentación por un Ing. Civil.

TABLA 17

RESUMEN DE CARGAS DE LA CIMENTACIÓN

Descripción de carga	Peso [Ton.]
Diseño	**11.74**
Actual	6.47
Encamisado	3.22
Total	**9.69**

La estructura concéntrica tendrá una separación de 2,5 cm de la actual; llegando a un diámetro medio de 1450 mm.

Una separación menor a la indicada causaría que los gases se puedan quedar atrapados, debido a que no existirá una suficiente diferencia de presión para que los gases sean evacuados.

Las dos chimeneas deben estar conectadas por medio de unas ventoleras.

También, se plantea la aplicación de un sistema de pintura adecuado y un reforzamiento en los anillos de sujeción.

- **Selección del material**

El material que se va a seleccionar debe cumplir con los requerimientos mencionados en el párrafo anterior, es decir resistencia a la abrasión y corrosión. En el mercado existen varias alternativas que representa una buena solución, además con una excelente relación costo/beneficio. En base a todas las razones expuestas anteriormente el acero que se utilizará es el ASTM A-588 GR A (ver apéndice D). Éste material posee alta resistencia a la corrosión porque contiene cierto porcentaje de cobre, entre 0.25-0.40, lo cual hace que se cree una capa de óxido de cobre llamada pátina, que retarda el efecto de la corrosión.

- **Descripción del sistema de soldadura**

Debido a que el proceso de soldadura para conformar la chimenea concéntrica se va a realizar en campo y a altura, en primera instancia se

consideró utilizar el proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding), pero como el peso de los equipos es demasiado para poder subirlos se descartó ésta opción y se seleccionó el proceso SMAW (Shield Metal Arc Welding), porque nos da la posibilidad de trabajar en altura para la correcta construcción de la chimenea y además es el proceso más común.

Para poder seleccionar el electrodo correcto, se debe tener en consideración el material que se va a soldar, en este caso es el acero A-588 (Acero de Baja Aleación), y las posiciones a las que se van a soldar. Usando como referencia la norma AWS D1.1/D1.1M:2006, se elaboró la tabla 18, la cual relaciona el material base, el proceso a utilizar y el tipo de electrodo.

Electrodo seleccionado: E-7018.

TABLA 18

REQUISITOS DE COMPATIBILIDAD DEL METAL BASE Y EL MATERIAL DE APORTE. [3]

Requisitos de compatibilidad de los metales de aporte			
Grupo	Material base	Proceso de soldadura	
		SMAW	GMAW
I	A36≤20mm espesor	E60XX o E70XX	ER70S-X
II	A36>20mm espesor	E70XX	ER70S-X
	A572 Grados 42, 50, 55		
	A588		
III	A572 Grados 60, 65	E80XX	ER80S-X
IV	A709	E90XX	ER90S-XX

La tabla completa se muestra en el apéndice E.

Debido a que todos los trabajos de soldadura necesitan de uno o más procedimientos de soldadura que definan con suficiente detalle, cómo deben realizarse las operaciones involucradas, a continuación se realiza una breve descripción de los WPS y PQR que se utilizaran para la reparación de la chimenea.

WPS (Welding Procedure Specification).

Es un formato en el cual se detallan todas las variables indispensables y suficientes para realizar una soldadura.

Los datos registrados en un WPS deben permitir al soldador, ajustar todos los parámetros de soldadura sin dejar nada libre a la interpretación.

Para la elaboración de las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS), se deben tener en consideración:

- Proceso de soldadura
- Diseño de la unión
- Metal base
- Metal de aporte
- Posición de la soldadura
- Características eléctricas
- Técnica para realizar el cordón

Además, de acuerdo al espesor del metal base se determinará si es necesario precalentamiento.

Para que el proceso de soldadura se realice de una manera correcta, se van a realizar los respectivos

WPS (ver apéndice F) para cada zona de la chimenea, las cuales se mencionan a continuación:

- Zona de la base (WPS 01 y detalle 1 en el plano 04).
- Zona alrededor del manhole, (WPS 01 y detalle 2 en el plano 04).
- Zona del ducto de entrada de gases (WPS 01 y detalle 3 en el plano 04).
- Zona de unión de las planchas verticales (WPS 02 y detalle 4 en el plano 04).
- Zona de unión de las planchas horizontales (WPS 03 y detalle 5 en el plano 04).
- Zona de unión de la chimenea actual con la nueva (WPS 04 y detalle 6 en el plano 04).

Para obtener la cantidad de electrodos que se utilizarán en todo el proceso de construcción, se necesita conocer la longitud de soldadura que existe y el tipo de juntas que se van a utilizar en cada parte de la chimenea, las cuales ya fueron definidos en los

WPS, por lo tanto la cantidad de soldadura a utilizar se muestra en la tabla 19. (El cálculo respectivo se encuentra en el apéndice G).

TABLA 19

CANTIDAD DE SOLDADURA A UTILIZAR

		Bisel "V"	Filete
Peso de material depositado [Kg]		0.373	0.322
Longitud [m]		110	25
Eficiencia de Consumible [%]		0.716	0.716
Cantidad electrodos en Kg	$\frac{Peso * Longitud}{Eficiencia\ del\ consumible}$	57	11.2
TOTAL [Kg]		**69**	

- **Descripción de las ventoleras**

La función principal de las ventoleras que se van a realizar en las chimeneas es comunicarlas.

Se propone estas ventoleras para evitar que al perforarse la chimenea existente, los gases de combustión se queden retenidos en el espacio entre ambas estructuras. Al colocar las ventoleras se creará una diferencia de presión con lo cual los

gases podrán ser evacuados hacia la chimenea actual y posteriormente al ambiente. (Ver figura 2.7)

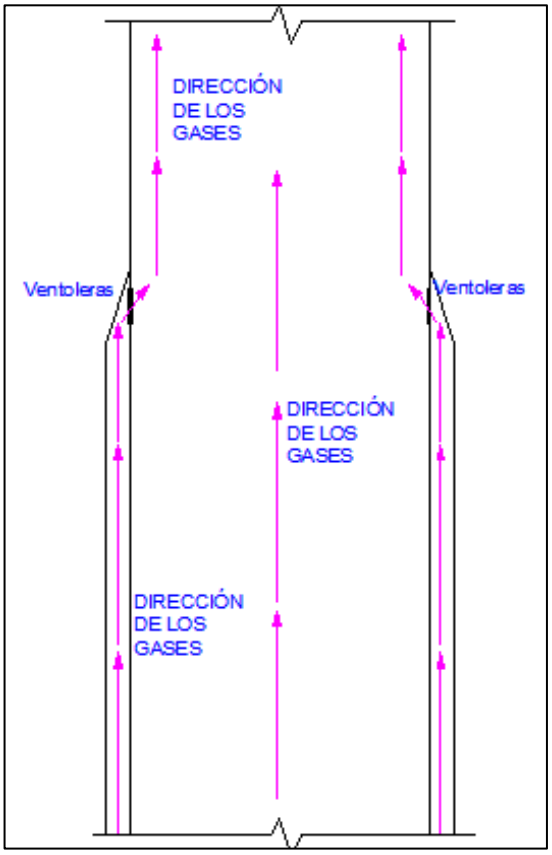


FIGURA 2.7. ESQUEMA DE SALIDA DE LOS GASES

En el caso de no colocar estas ventoleras, los gases de combustión quedarían atrapados, lo que produciría unos microclimas, con lo cual se incrementaría la velocidad de corrosión de la

chimenea actual, porque sufrirá corrosión química interna y externa. (Ver figura 2.8)

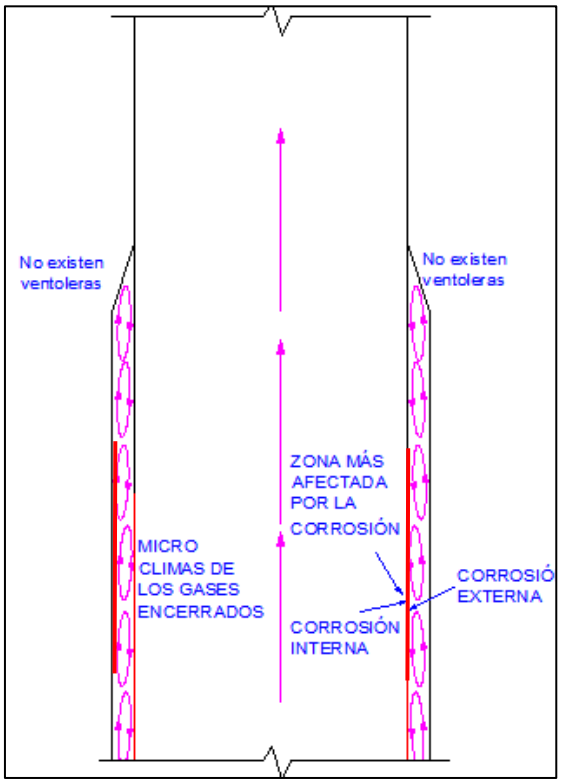


FIGURA 2.8. ESQUEMA DE GASES ENCERRADOS

Se instalarán seis ventoleras repartidas simétricamente la zona cercana al primer anillo flotante de la chimenea.

No resulta recomendable comunicar las chimeneas en la parte inferior pues esto facilitaría el ingreso de aire frío, lo que provocaría el enfriamiento de los

gases de combustión y generaría un incremento en la condensación de los mismos, acelerando la corrosión en el sector.

- **Sistema de pintura**

  Las pinturas son un medio de protección contra la corrosión, pues evitan el contacto directo entre el material de la estructura y el ambiente de trabajo, en este caso gases de combustión, con esto se evita un deterioramiento acelerado del material.

  Por este motivo se deberá aplicar un sistema de pintura interior a la nueva chimenea, con lo que se lograría extender la vida útil de la estructura.

  El sistema de pintura a emplear está compuesto por pinturas epóxicas con poliamida, las cuales poseen una gran cantidad de sólidos por volumen (SV=63%), poseen una buena resistencia a la temperatura de hasta 200ºC. (Ver apéndice H).

  El sistema de pintura a utilizar tendrá un espesor total de 180 µm, dividida en las siguientes capas:

- Primer: Epóxica con poliamida un espesor de 60µm.
- Intermedia: Epóxica con poliamida un espesor de 60 µm.
- Acabado: Epóxica con poliamida un espesor de 60µm.

Previo a la aplicación de éste sistema de pintura se realizará una limpieza del material, con un chorreado abrasivo seco grado Sa 2 ½, según la Norma ISO: 8501:1 /SIS: 05 5900; se seleccionó éste grado de limpieza porque el material a utilizar será nuevo y solo se desea eliminar la calamina que pueda existir del proceso de fabricación y además se crea un perfil de anclaje comprendido entre 25µm -40µm. (ver tabla 20)

TABLA 20

GRADOS DE LIMPIEZA SUPERFICIAL

SSPC	ISO	NACE	DESCRIPCIÓN
SP-5: Limpieza a metal blanco	Sa 3	1	Remover toda corrosión y contaminación visible, escama de laminación, pintura y cualquier material extraño hasta 100%
SP-10: Limpieza a metal casi blanco	Sa 2 1/2	2	Remover contaminantes hasta que un 95% de cada 9 pulg. cuadradas esté libre de corrosión visible, escama de laminación, pintura y material extraño.
SP-6: Limpieza a metal comercial	Sa 2	3	Remover toda corrosión hasta que aproximadamente dos tercios de 9 pulgadas cuadradas este libre de todo residuo visible.

La cantidad de pintura a utilizar es de 32 litros, como se muestra en la siguiente tabla; cuyos cálculos respectivos se muestra en el apéndice I.

TABLA 21

CANTIDAD DE PINTURA A UTILIZAR

Epoxy Poliamida con Hierro Micáceo	
Esp.total seca [um]	180
Área [m2]	85
SV[%]	0.63
Nº de capas	3.00
Espesor de capa seca [um]	60.00
Espesor de capa humeda [um]	95.24
Factor de aplicación **(airless)**	0.85
Factor de superficie **(nueva)**	0.90
Rendimiento práctico	8.03
Lts. por capa	10.58
Lts. Total de pintura	**32**

CAPÍTULO 3

3. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN SAP2000

Con toda la información recopilada en el capítulo 2, se procederá con la simulación y análisis de esfuerzos que actúan sobre la chimenea de molienda de coque.

A pesar de que estos análisis de esfuerzos pueden efectuarse de forma manual a través de las fórmulas existentes, la dificultad de los mismos hace que sólo se apliquen para resolver problemas sencillos de cargas estáticas; ya que el grado de dificultad del procesamiento de datos se incrementa al considerarse un mayor número de elementos, cargas dinámicas, efectos de temperatura, etc.

Los cálculos antes referidos también pueden realizarse a través de programas de simulación especializados en el análisis de esfuerzos, los cuales reducen en forma notable el tiempo de análisis. Una de las técnicas más usadas para el análisis de esfuerzos es el Método de los Elementos Finitos (FEM), por sus siglas en inglés.

En este capítulo, se realizarán todas las simulaciones para poder determinar los esfuerzos que se producen en la chimenea; para realizar las simulaciones se ha optado por el uso de un programa de Auto-Cad para definir la estructura 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; además permite realizar una discretización más pequeña de la chimenea, de modo que se obtengan resultados más reales.

3.1. 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

Anillo Flotante Superior

La ubicación de este anillo es a 30 m de altura aproximadamente, medidos desde el nivel del suelo, como se muestra en la figura 3.1.

La función de este anillo flotante es evitar que la chimenea se desplace por la acción del viento, por lo tanto solo posee restricción para desplazarse en el plano XY, pero con libertad para desplazarse en el eje vertical z. Este apoyo no resiste momentos.

Anillo Flotante Inferior

Este anillo se encuentra ubicado a una altura de 18 m aproximadamente, como se muestra en la figura 3.1.
Analizando la función de dicho anillo es la misma que el anillo flotante inferior, es decir que posee restricción para desplazarse en el plano XY, pero con la libertad para moverse en el eje vertical z. Este apoyo no resiste momentos.

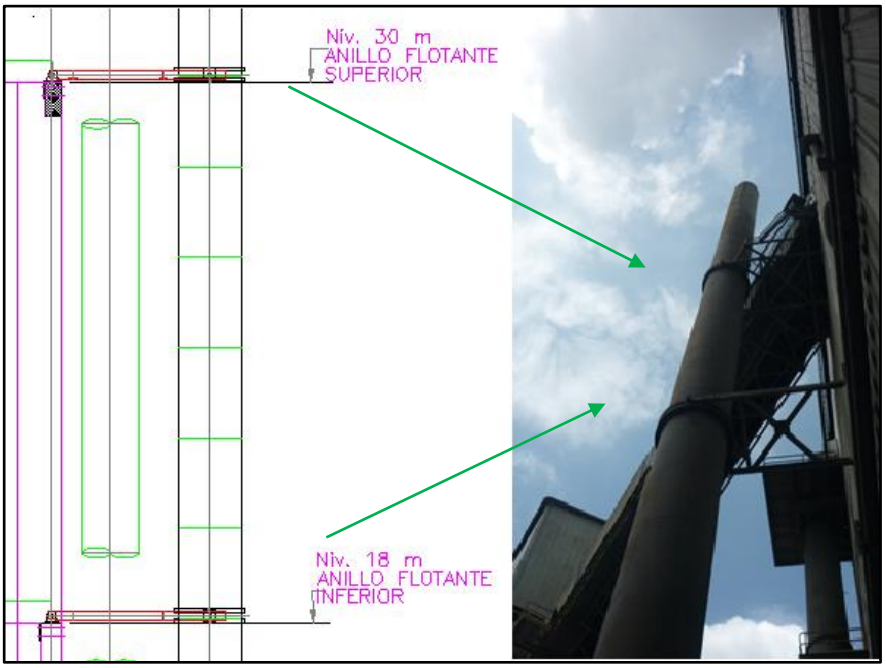


FIGURA 3.1. UBICACIÓN DE LOS ANILLOS FLOTANTES; SUPERIOR E INFERIOR

Entrada gases de combustión

La entrada de los gases de combustión se encuentra entre una altura de 4 a 7 m, tal como se muestra en la figura 3.2.

Analizando cómo funciona esta parte de la chimenea, se establece que es un apoyo empotrado que simula las uniones empernadas sin deslizamiento, por lo tanto tiene

restricción para desplazarse en los tres ejes X, Y, Z, además que puede resistir momentos.

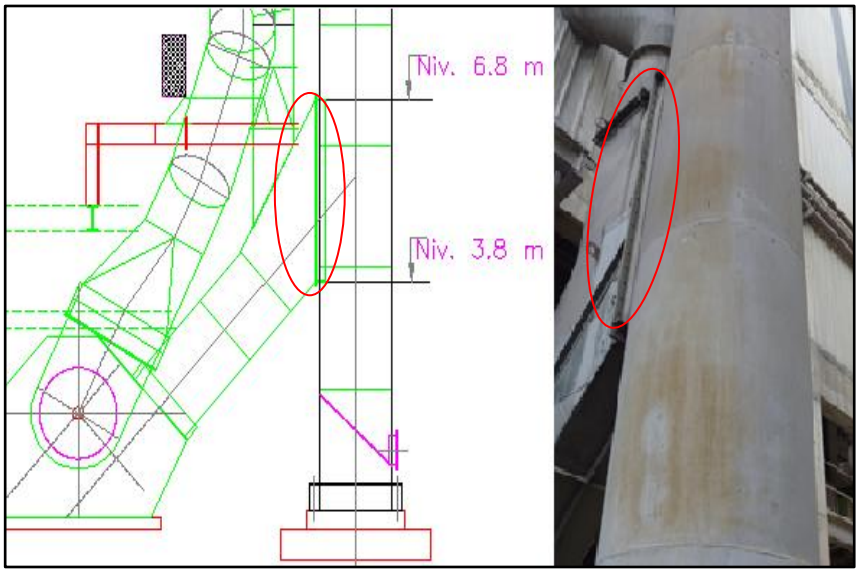


FIGURA 3.2. DUCTO PARA ENTRADA DE GASES DE COMBUSTIÓN A LA CHIMENEA

Anclaje a la cimentación

El anclaje de la chimenea al piso, como se muestra en la figura 3.3, es una de las partes más importantes de la misma, debido a que sobre la cimentación descansa todo el peso de la estructura y sus accesorios; además debe resistir todo el momento producido por la acción de la fuerza del viento.

Para el análisis de este apoyo se lo consideró como rígido, es decir posee restricción para desplazarse en los tres ejes X, Y, Z y con la capacidad de resistir momentos.

FIGURA 3.3. ANCLAJE DE LA CHIMENEA AL SUELO (CIMENTACIÓN)

Luego de haber realizado el análisis y determinación de las restricciones que actúan sobre la chimenea, a continuación se muestra una tabla, en la cual se resumen las cuatros regiones de la chimenea con su respectiva restricción.

TABLA 22

RESUMEN DE LAS 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

3.2. Tipos de cargas a considerar para el modelado

Para realizar una aproximación más real (simulación) 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.

Carga muerta

Son aquellas cargas que actúan durante toda la vida de la estructura, la principal carga muerta es el peso propio de la estructura.

Para el caso en estudio, la chimenea no posee elementos adicionales que producirian un peso extra, por este motivo la carga muerta que se considerará es el peso teórico propio de la chimenea, el cual depende del peso específico del material, para éste caso se ha analizado con el peso específico del Acero A-36 y A-588 con los espesores que se muestran en tabla 2 respectivamente.

Carga térmica

Los cambios de temperatura producen dilataciones o contracciones en la estructura general y en sus elementos componentes. Estos cambios pueden producir o no, fuerzas adicionales dependiendo del grado de restricción de la estructura y de sus elementos.

A la carga térmica se la considerará como una carga viva, debido a que siempre está en constante cambio, es decir existirán fluctuaciones de temperaturas.

Para el caso que se va analizar, los valores de temperaturas se muestran en la tabla 7.

Carga de viento

Uno de los estados de cargas con mayor influencia sobre el diseño de la chimenea, es la fuerza producida por el viento; esta fuerza depende de la velocidad del viento, ubicación, altura, área y posición de la estructura.

En la figura 3.4 se muestra como varía la presión producida por el viento; nótese que la carga será aplicada solo sobre una cara de chimenea.

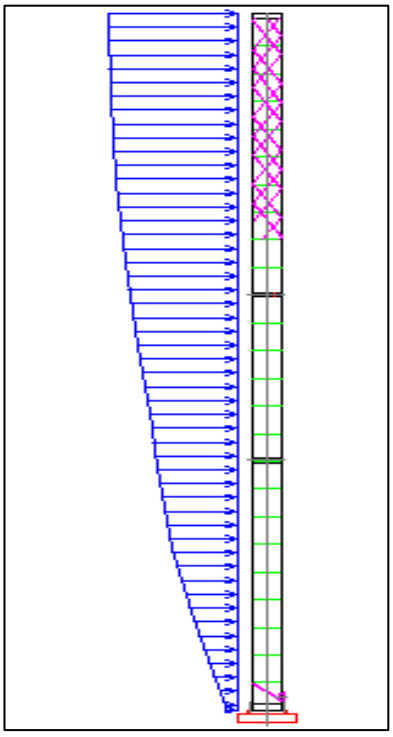


FIGURA 3.4. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN DEL VIENTO CON RESPECTO A LA ALTURA

El valor de ésta carga será calculada en base a los parámetros que indica la Norma ASCE 7-05 y con una velocidad de viento básica de 140 Km/h. En el apéndice J se puede encontrar un ejemplo de cálculo de la fuerza del viento y sus respectivos resultados que se aplicarán en la chimenea

Carga sísmica

Debido a que el Ecuador se encuentra ubicado en una zona donde pueden ocurrir sismos de mediana intensidad, esta carga no puede ser despreciada.

Este tipo de carga está relacionada con la masa y la altura desde el nivel del suelo de la estructura, también depende de la aceleración del terreno, así como la capacidad de la estructura para disipar ésta energía.

Para las simulaciones la carga sísmica se la modelará de forma dinámica de acuerdo al CEC, para ello se deberá crear el espectro sísmico correspondiente a la zona donde se encuentra la chimenea.

En este caso la chimenea se encuentra en una zona de riesgo sísmico de III; riesgo medio, como se muestra en las figura 3.5 y tabla 23.

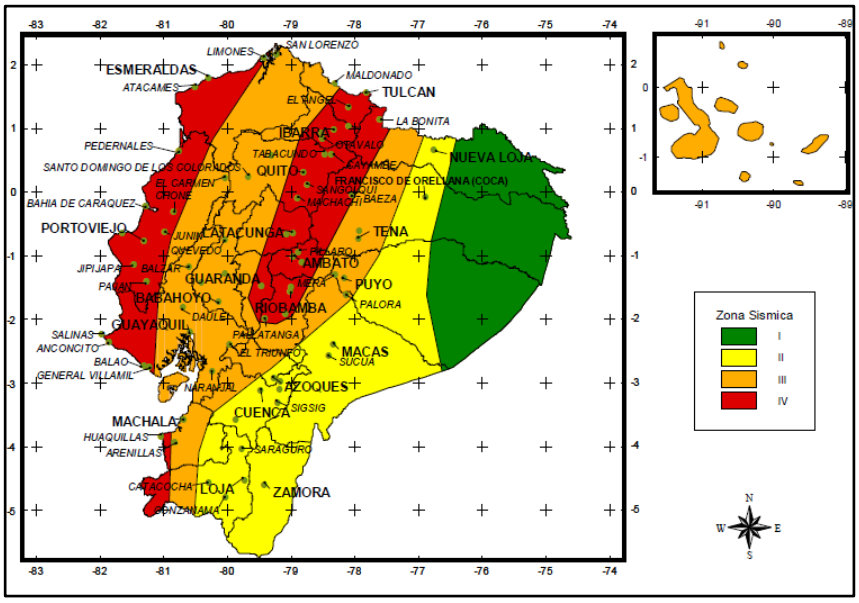


FIGURA 3.5. ECUADOR, ZONAS SÍSMICAS PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO. [9]

TABLA 23
VALORES DEL FACTOR Z EN FUNCIÓN DE LA ZONA SÍSMICA ADOPTADA [9]

Zona Sísmica	I	II	III	IV
Valor factor Z	0.15	0.25	0.3	0.4

Luego se debe calcular las aceleraciones y frecuencias, para lo cual, se utilizará la siguiente ecuación.

$$C = \frac{1.25 * S^S}{T}$$

Ecuación 2.1

Donde el valor de S se obtiene de la tabla 24.

TABLA 24

COEFICIENTE DE SUELO S Y COEFICIENTE Cm. [9]

Pefil tipo	Descripción	S	Cm
S1	Roca o suelo firme	1.0	2.5
S2	Suelos intermedios	1.2	3.0
S3	Suelos blandos y estracto profundo	1.5	2.8
S4	Condiciones especiales de suelo	2.0*	2.5

(*)= Este valor debe tomarse como minimo, y no substituye los estudios de detalle necesarios para construir sobre este tipo de suelos.

En la figura 3.6 se muestra el espectro sísmico que se utilizará en las simulaciones.

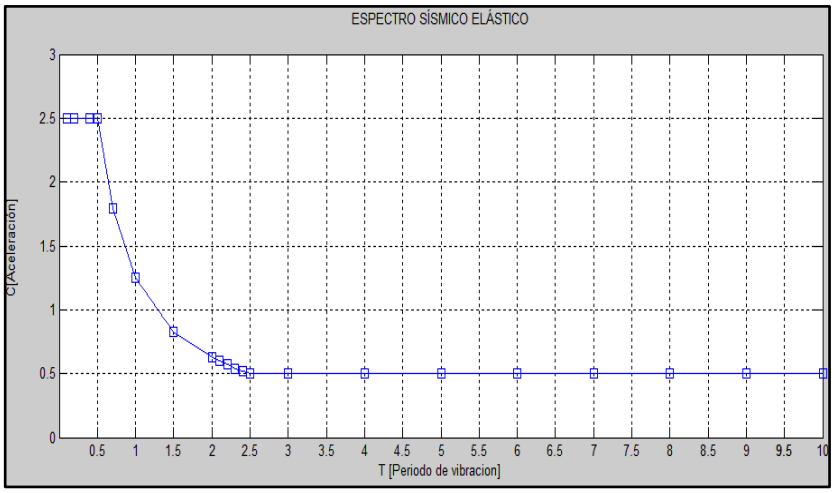


FIGURA 3.6. ESPECTRO SÍSMICO ELÁSTICO CALCULADO

Combinaciones de cargas

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.

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

TABLA 25

COMBINACIONES DE CARGA [2]

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

Dónde:

D: Carga Muerta

L: Carga viva debida a la ocupación

Lr: 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

Debido a que las cargas mínimas de diseño son: muerta, temperatura, viento y sísmica, se seleccionarán las ecuaciones que se ingresarán al programa SAP2000, para el cálculo respectivo de esfuerzos.

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 $1.2D \mp 1.0E + 0.5L$

3.3. Escenarios a ser simulados

En el capítulo 2, se realizó la recolección de información necesaria para el análisis de la estructura y además se planteó una posible solución, en esta sección se procederá con las simulaciones de la chimenea y de la propuesta mencionada.

Estas simulaciones se llevarán a cabo en dos escenarios distintos que se mencionan a continuación:

- Condición actual
- Solución propuesta: Construcción de una chimenea concéntrica, hasta 18 m (Anillo flotante inferior).

3.3.1. Condición actual

La primera simulación que se va a realizar es la condición actual de la chimenea, porque será indispensable para determinar si la chimenea ha sufrido deformaciones plásticas debido a la gran pérdida de espesor que se ha presentado en la misma y determinar si puede seguir en funcionamiento sin riesgo alguno.

El primer paso para realizar la simulación es dibujar el modelo geométrico la chimenea en el programa Auto-Cad, con las dimensiones que se muestran en el plano 01, el dibujo se muestra en la figura 3.7.

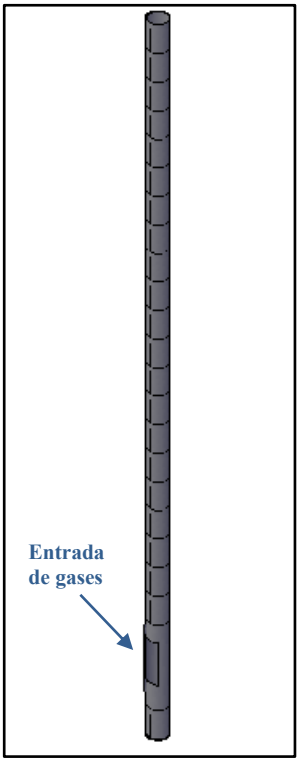


FIGURA 3.7. MODELO GEOMÉTRICO DIBUJADO EN AUTO-CAD CON ELEMENTOS 3D FACE

Luego se realiza la importación de la chimenea al programa SAP2000 y su respectiva discretización; como se muestra en la figura 3.8.

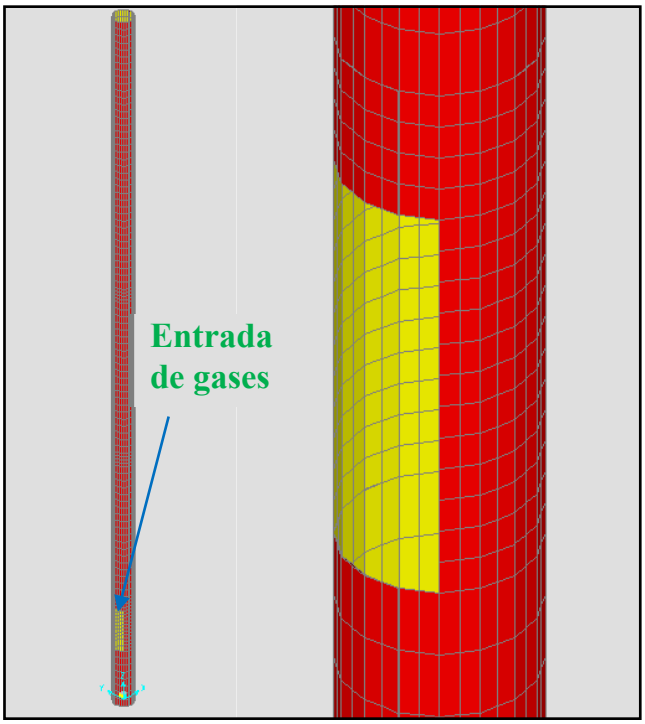


FIGURA 3.8. DISCRETIZACIÓN DE LA CHIMENEA EN SAP2000

Se deben asignar los materiales con las secciones respectivas, es decir el espesor de cada plancha, los espesores asignados son los que se muestran en la tabla 2.

En la figura 3.9 se muestra como se realiza la asignación de dichas secciones.

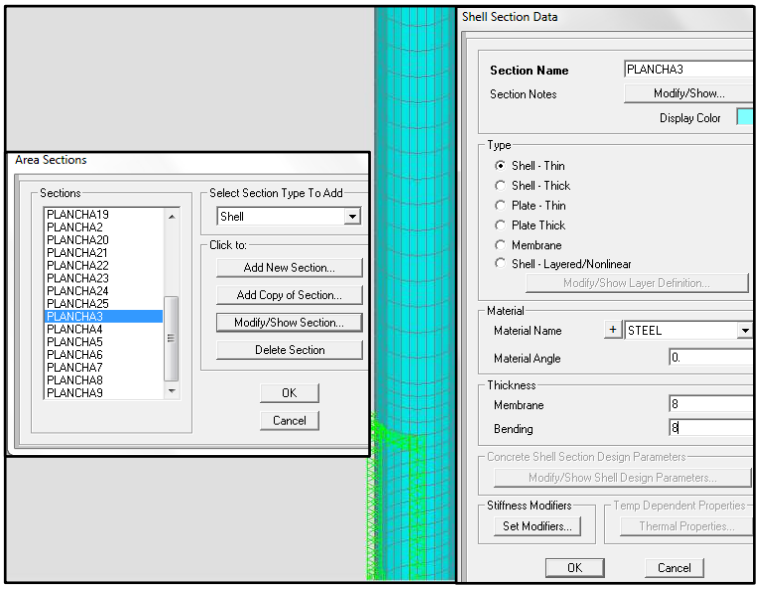


FIGURA 3.9. ASIGNACIÓN DE SECCIONES

En seguida se procede con la creación y asignación de las cargas que se utilizarán en la chimenea, según los cálculos realizados previamente.

La carga de temperatura asignada es la que se muestra en la tabla 7, la carga de viento y sísmica son los valores que se obtienen del cálculo respectivo y se muestran los apéndices J y K respectivamente. (Ver figura 3.10)

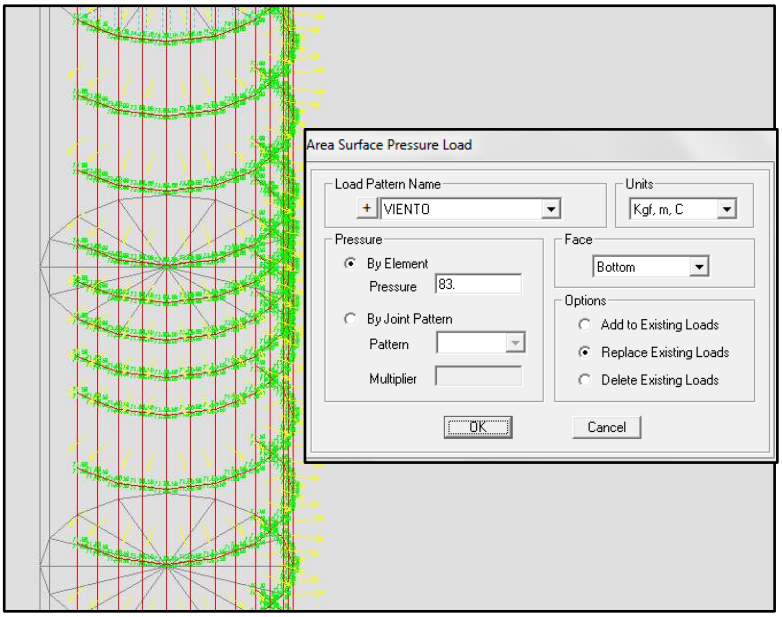


FIGURA 3.10. CARGA DE VIENTO ASIGNADA

Se deben asignar las condiciones de frontera en las cuatros regiones principales que se encuentran en la tabla 22; dichas condiciones y su asignación se muestran en la figura 3.11.

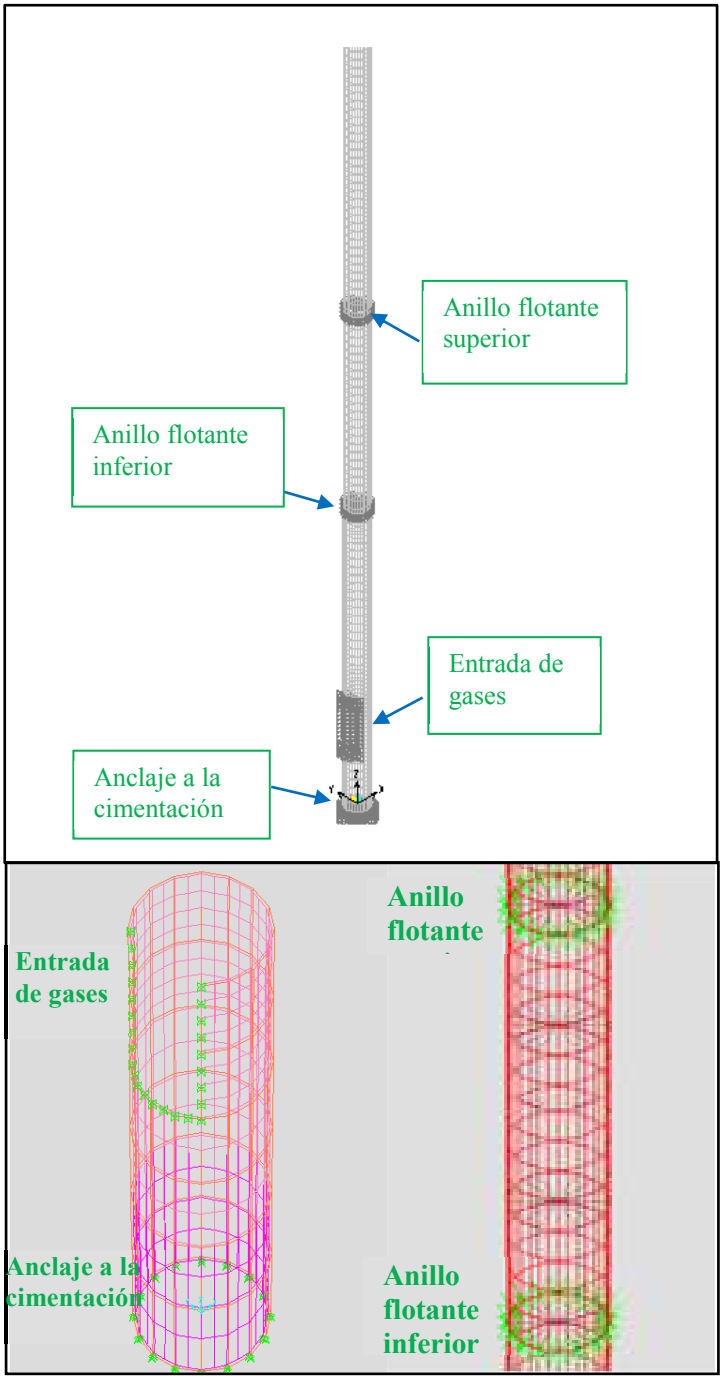


FIGURA 3.11. ASIGNACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA

El paso final es la solución y post-procesamiento de resultados, en donde se muestran los valores de los esfuerzos de Von Misses en forma gráfica, como se ilustra en la figura 3.12.

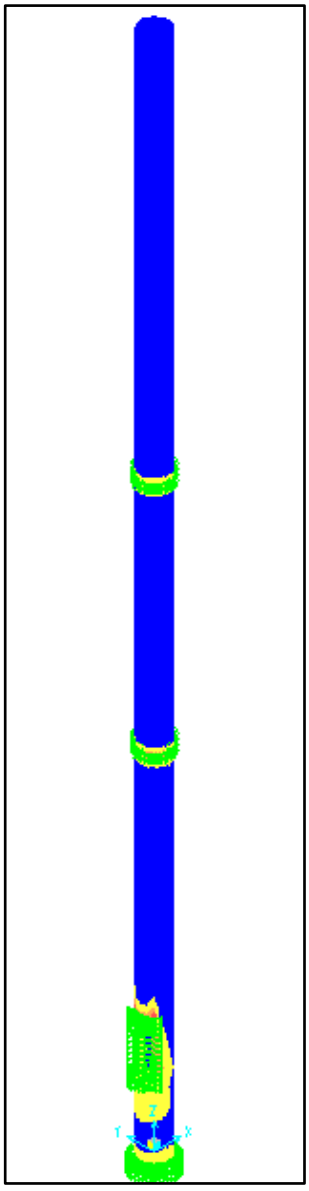


FIGURA 3.12. ESFUERZOS DE VON-MISSES RESULTANTES EN LA CHIMENEA

3.3.2. Alternativa de mejora

Se analizará la alternativa de mejora que fue propuesta en el capítulo 2, con el objetivo de determinar el comportamiento de la estructura a esta solución desde el punto de vista de los esfuerzos.

Construcción de una chimenea concéntrica

Esta simulación es similar que la que se realizó anteriormente, solo con unas diferencias que se muestran a continuación.

El material a utilizar es el acero ASTM A-588 Grado A, el cual se encuentra formando una chimenea concéntrica hasta 18 m de altura.

El modelo geométrico de la chimenea se lo realiza con las dimensiones que se muestran en plano 03, note que la transición con la chimenea actual es cónica para distribuir de mejor forma los esfuerzos. (Ver figura 3.13)

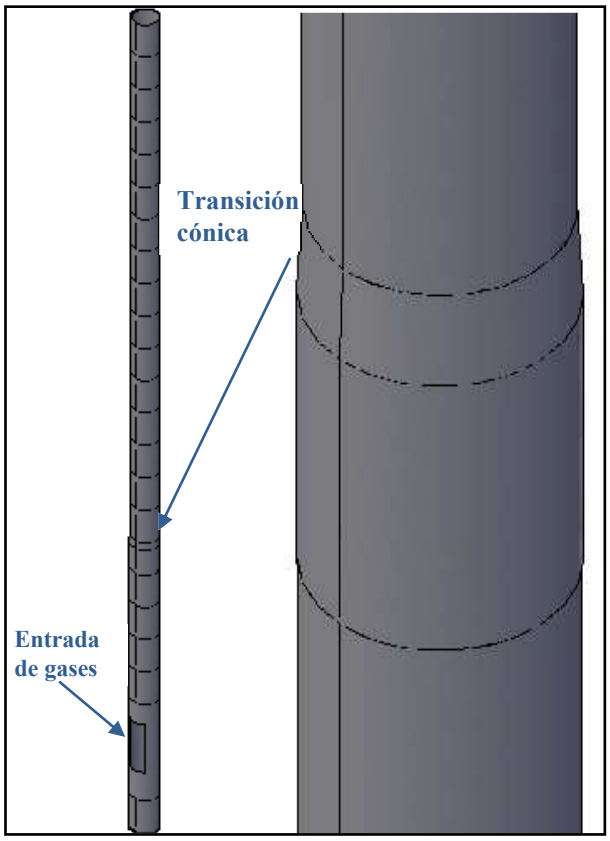


FIGURA 3.13. DIBUJO DE LA CHIMENEA EN AUTO-CAD

La discretización de la unión con la chimenea actual debe ser más pequeña, porque esta zona es cónica y se requiere mayor precisión. (Ver figura 3.14)

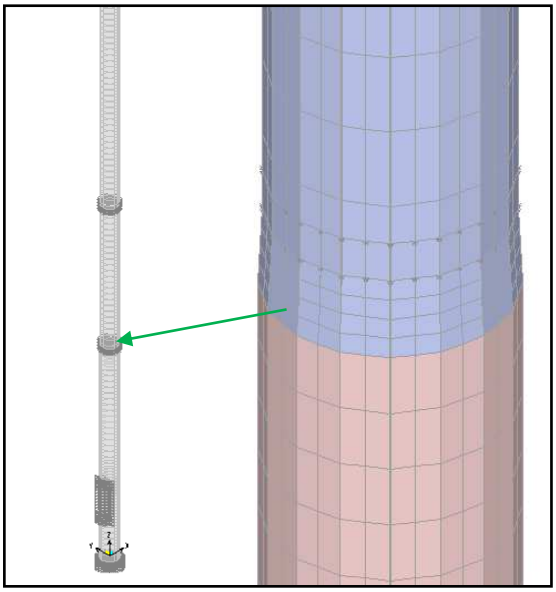


FIGURA 3.14. CHIMENEA DISCRETIZADA EN LA ZONA DE TRANSICIÓN EN SAP2000

La asignación de los materiales con las secciones, la carga muerta, viento, temperatura y sísmica son las mismas que la simulación anterior y se la realiza de igual manera, lo mismo ocurre con las condiciones de frontera.

Posteriormente se realiza el cálculo y el análisis de los esfuerzos; los cuales se muestran en forma gráfica en la figura 3.15.

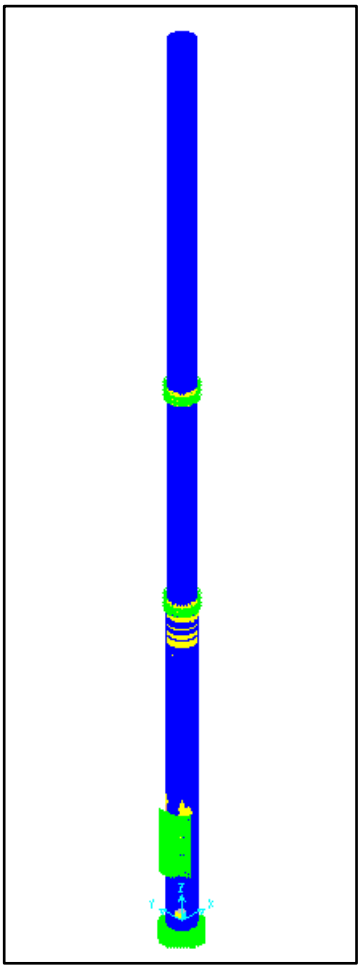


FIGURA 3.15. VISUALIZACIÓN DE ESFUERZOS

3.4. Resultados de las simulaciones

El análisis estructural de la chimenea se ha enfocado en los Esfuerzos de Von Mises y los desplazamientos producidos en el extremo superior de la estructura bajo la aplicación de las cargas y combinaciones de la misma.

Para el caso de los esfuerzos se han analizado en los puntos críticos donde se podría presentar las mayores concentraciones de esfuerzos.

A continuación, se muestra de forma más detallada los resultados obtenidos en las simulaciones.

Condición actual

Analizando los resultados obtenidos de la simulación, se puede observar que el lugar donde se presentan los esfuerzos máximos, es en la zona de descarga de los gases. Esto se debe a que esta zona tiene restringido todos sus movimientos, y además este sector posee los máximos valores de temperatura de los gases.

Por este motivo las planchas están soportando una concentración de esfuerzos y una mayor dilatación por acción de la temperatura, como se muestra en la figura 3.16.

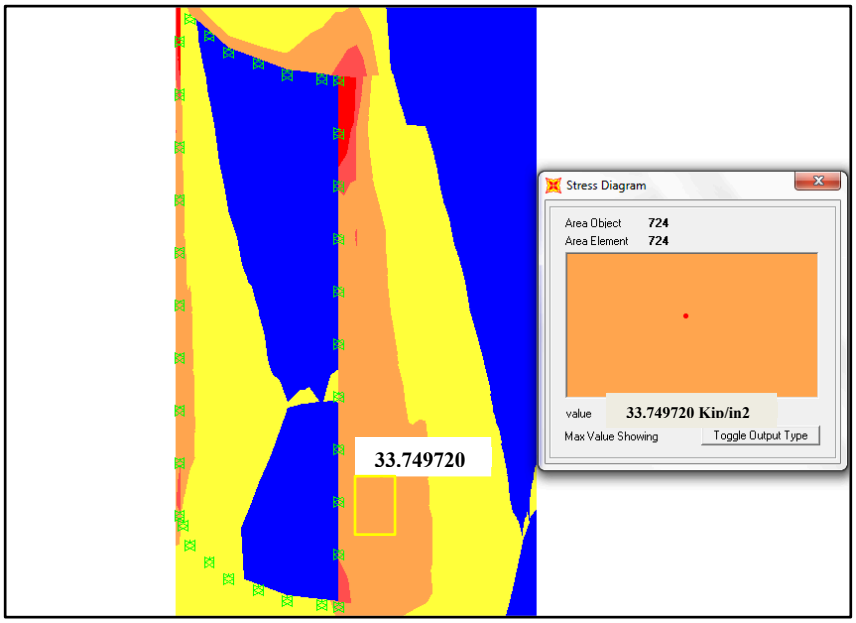


FIGURA 3.16. MAPA DE ESFUERZOS EN LA ZONA DE DESCARGA DE LOS GASES

El máximo valor del esfuerzo de Von Misses se presentó, debido a la combinación de cargas Nº1 (COMB1) que actúa en la chimenea, este fue de 33.75 Kips (233 MPa.), el cual representa el 93.75 % del esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36, actual material de la chimenea.

También se encontraron valores máximos de esfuerzos en el anillo flotante superior, esto debido a la flexión que se produce en el extremo superior de la chimenea por la

acción del viento, ya que estos puntos son los que soportan dicho desplazamiento, su valor es de 28.55 Kips, como se puede observar en la figura 3.17.

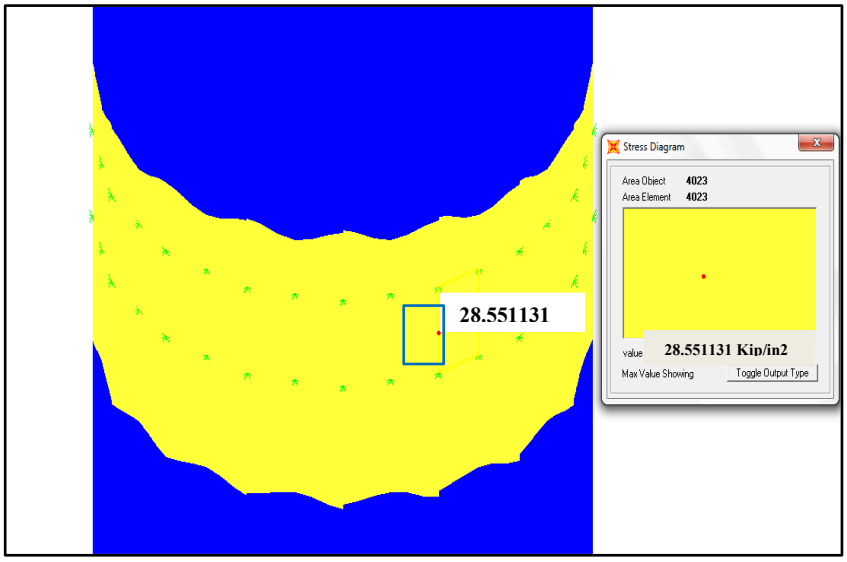


FIGURA 3.17. ESFUERZOS EN EL ANILLO FLOTANTE SUPERIOR

El máximo desplazamiento se obtiene con la combinación de carga Nº2 (COMB2) que actúa sobre la chimenea, este desplazamiento es de 1.65mm en dirección del eje x (U1),-54.91mm en dirección del eje y (U2), y de 12.7mm en dirección del eje z (U3), como se muestra en la figura 3.18.

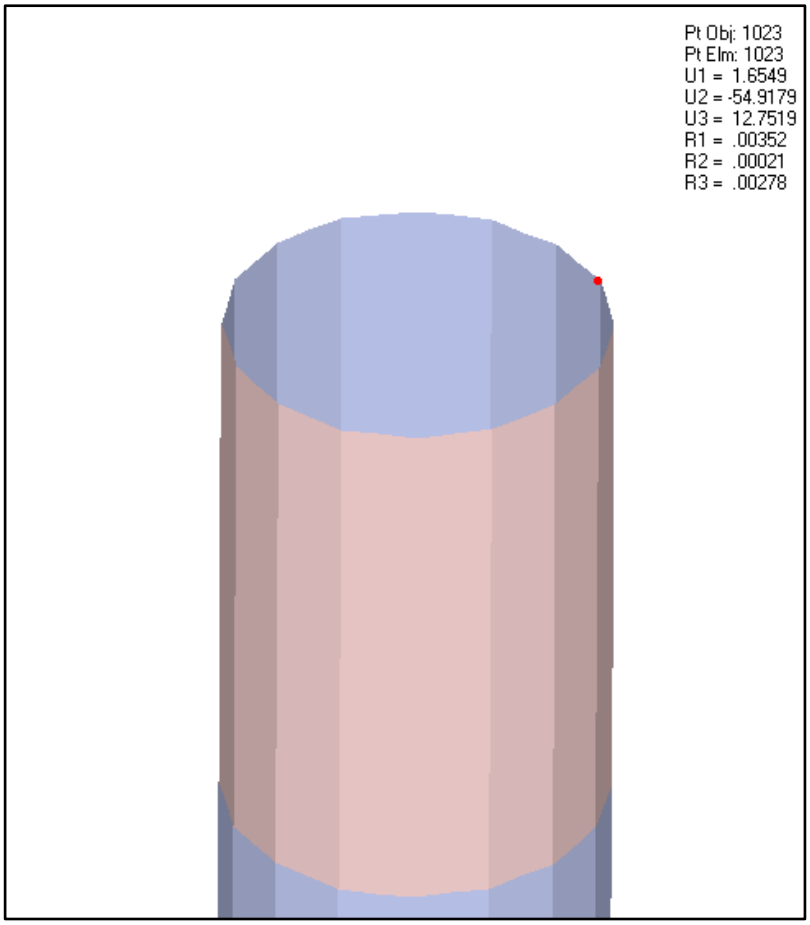


FIGURA 3.18. DESPLAZAMIENTOS EN LA PARTE SUPERIOR DE LA CHIMENEA

Construcción de una chimenea concéntrica

Los valores de Esfuerzos de Von Mises de la chimenea concéntrica presentes en la zona de descarga de gases disminuyen considerablemente llegando a un valor de

4.68 Kips (COMB1), mientras que el esfuerzo en la chimenea interior es 31.86 Kips como se ilustra en la figura 3.19.

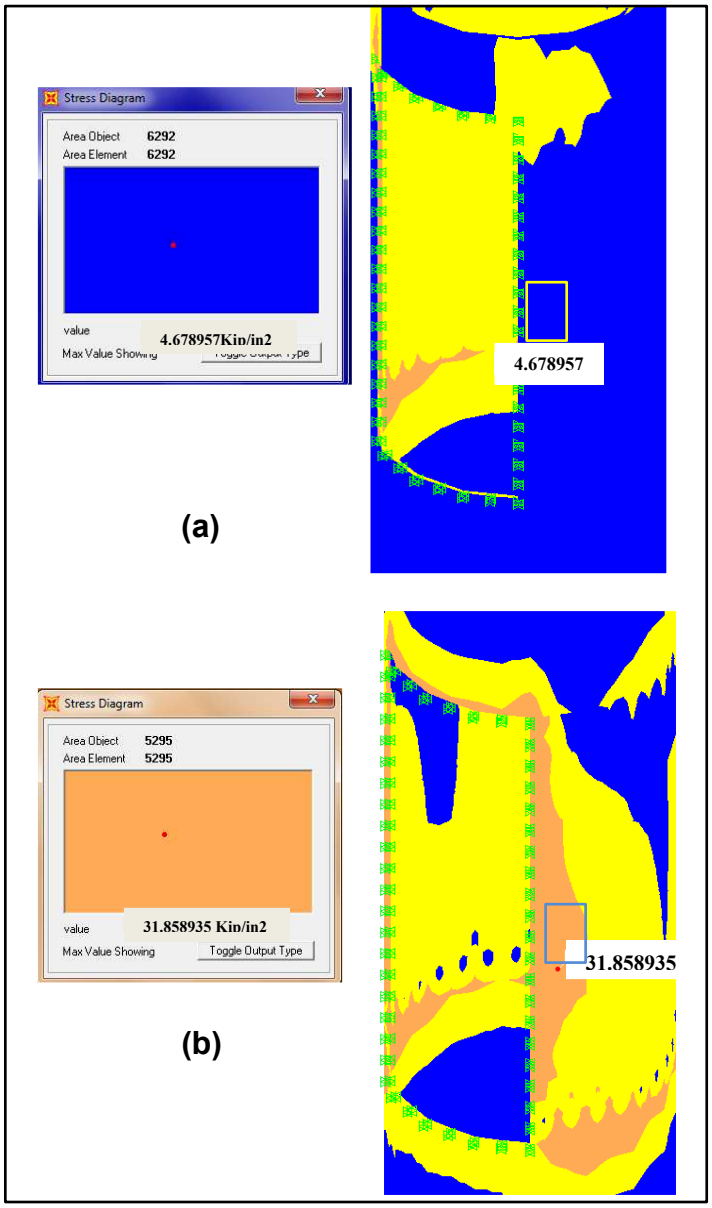


FIGURA 3.19. ESFUERZOS EN LA CHIMENEA CONCÉNTRICA (a); INTERIOR (b)

Esto se debe a que la deformación térmica y por consiguiente la presencia de esfuerzos térmicos se dan únicamente en el anillo de la chimenea interior que se encuentra en contacto con los gases de combustión, mientras que en el anillo exterior solo se producen esfuerzos por la carga muerta de la estructura y la acción del viento.

El valor máximo de esfuerzo en el anillo flotante superior es parecido al que se obtuvo en la simulación de la condición actual de la chimenea debido a que la carga de viento es la misma; su valor es de 28.83 Kips. (Ver figura 3.20)

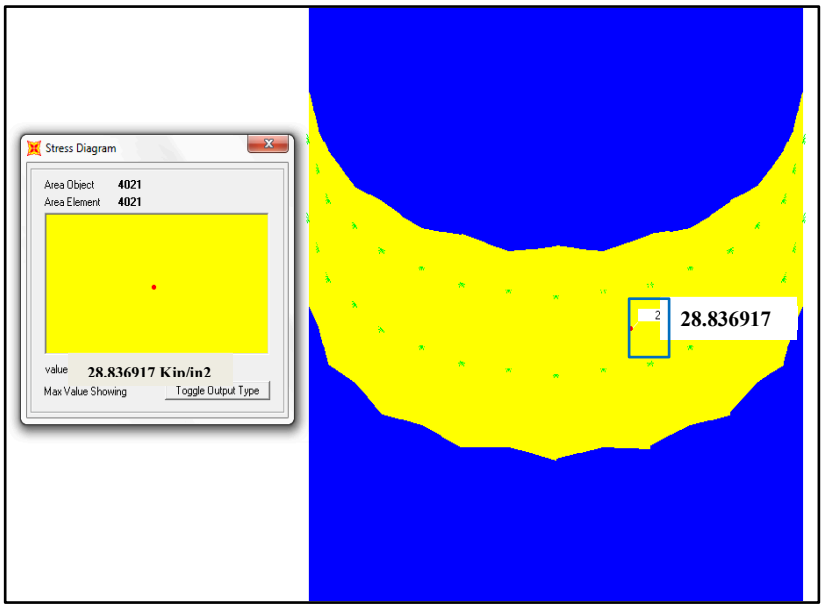


FIGURA 3.20. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN EL ANILLO FLOTANTE SUPERIOR

El máximo desplazamiento se presenta en el extremo superior de la chimenea (50 m) y al igual que la simulación anterior se produce por el COMB 2, cuyo valor es de 1.83mm en dirección del eje x (U1), -54.88mm en dirección del eje y (U2), y de 10.16mm en dirección del eje z (U3). Como se observa estos valores son muy parecidos a los obtenidos en la simulación anterior. (Ver figura 3.21)

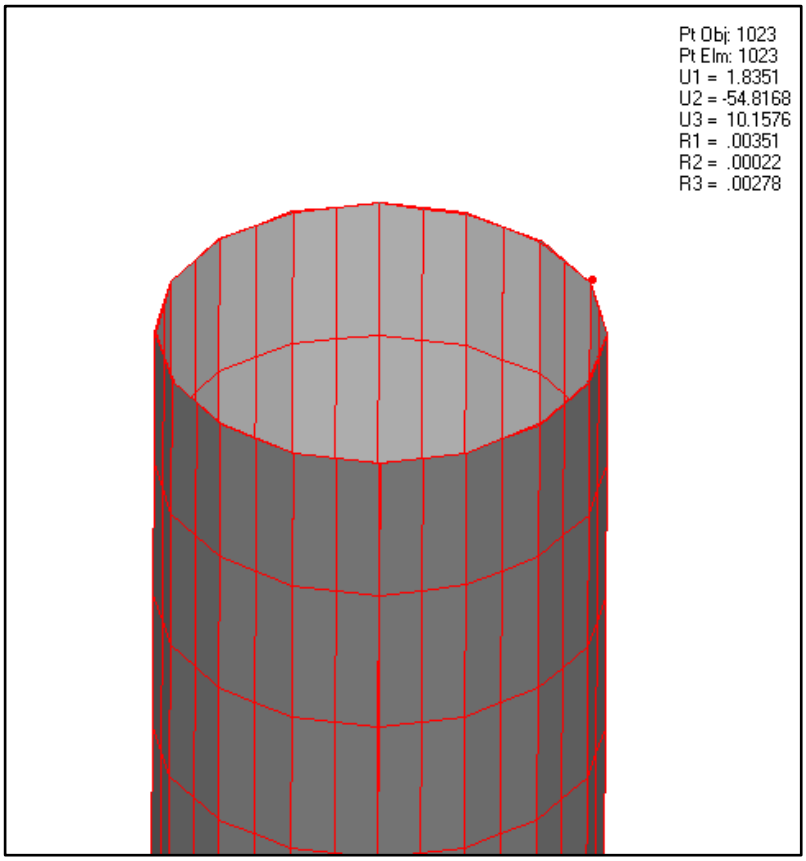


FIGURA 3.21. MOVIMIENTO DE LA CHIMENEA EN LA PARTE SUPERIOR

CAPÍTULO 4

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.

4.1. Análisis técnico

En el análisis técnico se debe determinar si la nueva chimenea cumple con los requerimientos técnicos que se establecieron en el capítulo 2 o si existe alguna restricción que imposibilite el desarrollo del proyecto en su parte técnica.

También se van 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

Resistencia a la corrosión

Debido a que la alternativa propuesta se construirá usando acero ASTM A-588, y además se aplicará un sistema de pintura interno resistente a la temperatura, la resistencia a la

corrosión de la alternativa planteada es buena; de esta forma se lograría extender la vida útil de la chimenea.

Proceso de soldadura a utilizar

La implementación de la solución es sencilla, porque el proceso de construcción es como el de una tubería, el proceso de soladura SMAW es el convencional y más usado en esa planta cementera.

Estabilidad estructural

La estabilidad estructural es excelente, debido a que existe independencia entre las dos chimeneas, esto se confirma con los valores de esfuerzos máximos que se obtuvieron de las simulaciones.

Los valores de esfuerzos encontrados en la simulación de la solución disminuyen considerablemente con relación a la condición actual de la chimenea.

Resistencia de la cimentación

En realidad no se conoce con exactitud cómo fue diseñada la cimentación, pero se presume que fue diseñada para resistir el peso inicial de la chimenea en el año 2003 (11.7 Ton.); el peso que se le va adicionar sumado el peso actual de la chimenea apenas se alcanzan un valor de 9.7 Ton con lo cual no se está excediendo el peso inicial que resistía la cimentación y por lo tanto no se debería afectar estado de la misma.

En la siguiente tabla se muestran las ventajas y desventajas de la solución propuesta.

TABLA 26

FORTALEZAS Y DEBILIDADES DE LA ALTERNATIVA

FORTALEZAS	DEBILIDADES
• Alta resistencia a la corrosión y mayor punto de fluencia que el material de construcción.	• El costo de reparación puede ser un poco elevado.
• El proceso de soldadura es relativamente sencillo.	• Tal vez sea necesario un refuerzo en la cimentación actual.
• Extiende la vida útil de la estructura.	
• Los esfuerzos disminuyen, porque se consigue independencia estructural.	

Programación de la Obra

La programación de la obra consiste en estimar todos los tiempos de cada uno de los procesos necesarios para la ejecución de la misma, y sincronizarlos de modo que todos los procesos empiecen y terminen en los tiempos establecidos.

Se deben tener en consideración todos los posibles contratiempos (retrasos en la ejecución de la obra), para evitar que esta programación se salga del cronograma previsto.

Además la construcción de la chimenea concéntrica se va a realizar sin paralizar la operación de la chimenea actual.

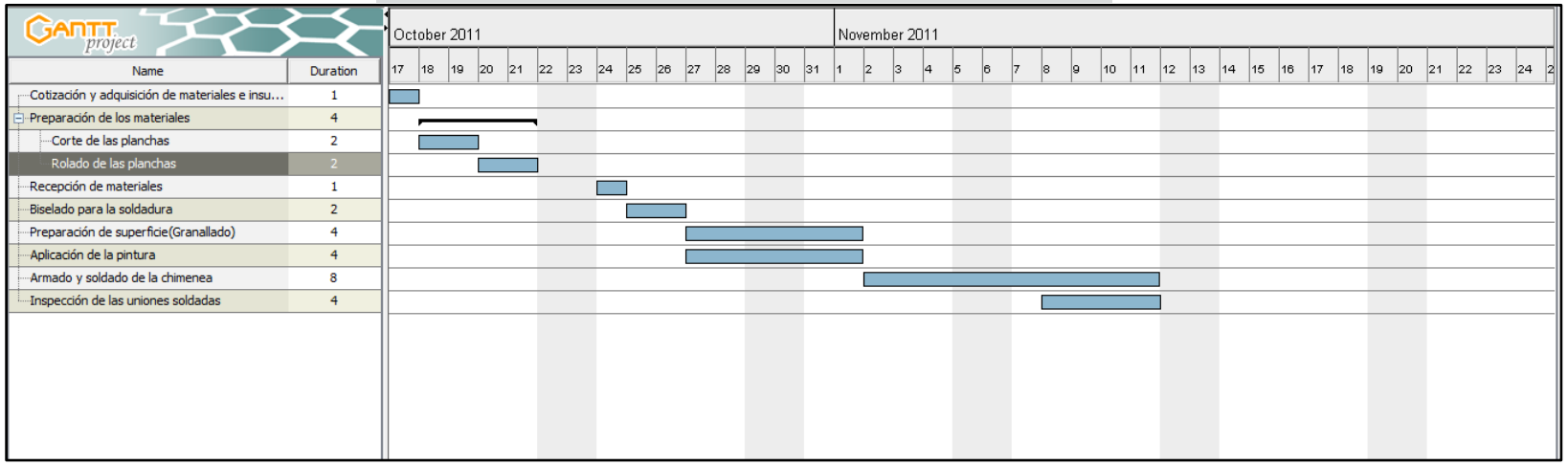
Los procesos a seguir para la construcción de la chimenea concéntrica son:

- Cotización y adquisición de materiales e insumos
- Preparación de los materiales
    - Corte de las planchas
    - Rolado de las planchas

- Recepción de materiales
- Biselado para la soldadura
- Preparación de superficie (Granallado)
- Aplicación de la pintura
- Armado y soldado de la chimenea
- Inspección de la soldadura

El tiempo que requerido para realizar cada uno de los procesos mencionados anteriormente se detalla en el Diagrama de GANTT que se muestra a continuación.

FIGURA 3.22. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES



4.2. 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.

Para calcular el precio que costaría la implementación de la solución existen dos formas; la primera es cuantificar en forma global el peso de la estructura y multiplicar ese peso con el precio actual del acero, pero este valor no será tan aproximado.

La segunda y la que se utilizará en esta tesis es cuantificar la cantidad exacta de los diferentes elementos que se van a utilizar y se realiza el cálculo del costo con el precio individual de cada elemento, esto método permite tener un valor más real y exacto del costo de la obra.

A continuación se detallarán todos los costos relacionados con la reparación de la chimenea, para lo cual se realizará

un presupuesto en donde se incluye el costo de los materiales y el costo de la mano de obra.

TABLA 27

PRESUPUESTO REFERENCIAL DE MATERIALES

PRESUPUESTO DE MATERIALES					
ITEM	**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**	**CANT.**	**Unidad**	**PRECIO U.**	**PRECIO T.**
	Plancha de acero ASTM A588;Grado A (1220x2440x5mm)	30	U.	245.65	7369.5
	Electrodos E7018 C1; Ø=1/8"	69	Kg.	4.34	299.46
	Disco abrasivo	6	U.	2.88	17.28
	Pintura epoxica con poliamida (SIGMACOVER	30	Lts.	14.85	445.5
				SUB-TOTAL	8131.74
				IVA 12%	975.81
				TOTAL	**9107.55**

TABLA 28

COSTO DE MANO DE OBRA

COSTO DE LA MANO DE OBRA					
ITEM	**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**	**CANT.**	**Unidad**	**PRECIO U.**	**PRECIO T.**
	Dirección técnica	1	U.	1600	1600
	Corte de las planchas	36	U.	26	936
	Rolado de las planchas	60	U.	29	1740
	Preparación superficial	85	m2	8	680
	Aplicación de la pintura	85	m2	9	765
	Soldadores calificados	2	U.	380	760
	Armadores	2	U.	350	700
	Inspección de la soldadura	70	m.	5	350
				SUB-TOTAL	7531
				IVA 12%	903.72
				TOTAL	**8434.72**

TABLA 29

PRESUPUESTO REFERENCIAL TOTAL

COSTO TOTAL	
RUBRO	**PRECIO**
Costo de los materiales	9107.55
Costo de la mano de obra	8434.72
Imprevistos (5%)	877.11
TOTAL	**18419.38**

Ahora se unen las cotizaciones de costo de materiales y costo de mano de obra para obtener el valor total del proyecto.

El valor de la construcción de la chimenea concéntrica es de 18.419,38 USD.

Al comparar el costo de la implementación de la chimenea concéntrica 18.419,38 USD, con el valor que significa detener la operación de la chimenea actual 100.000 USD, por lo tanto es factible la reparación.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se concluye lo siguiente:

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 18.419,38 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

Se recomienda lo siguiente:

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.

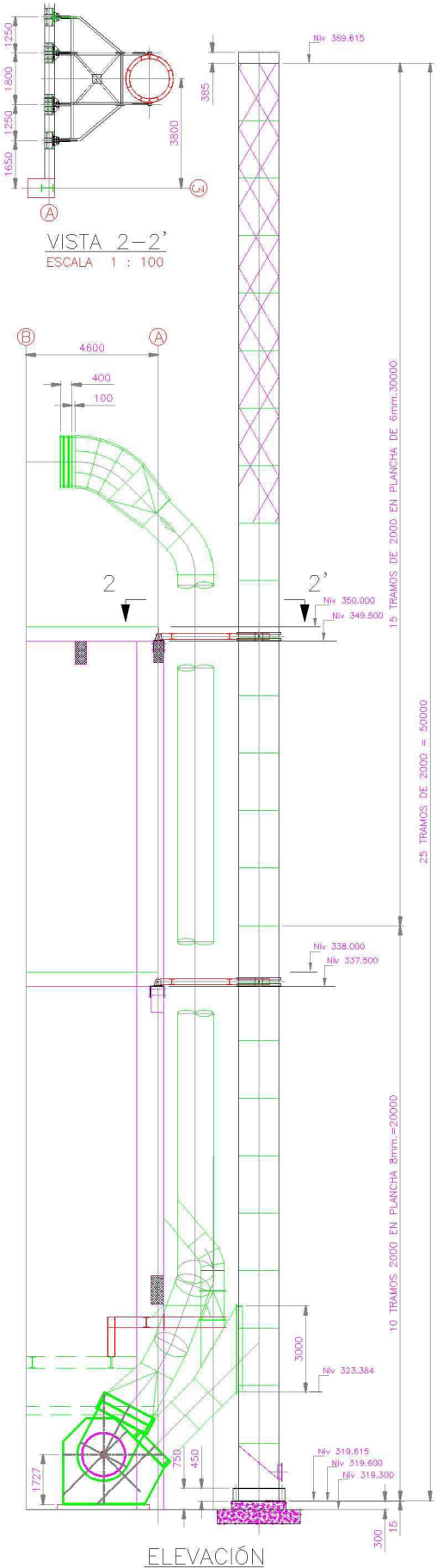
7. Realizar un estudio más detallado para determinar el peso y momento de volteo que resiste la cimentación.

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.

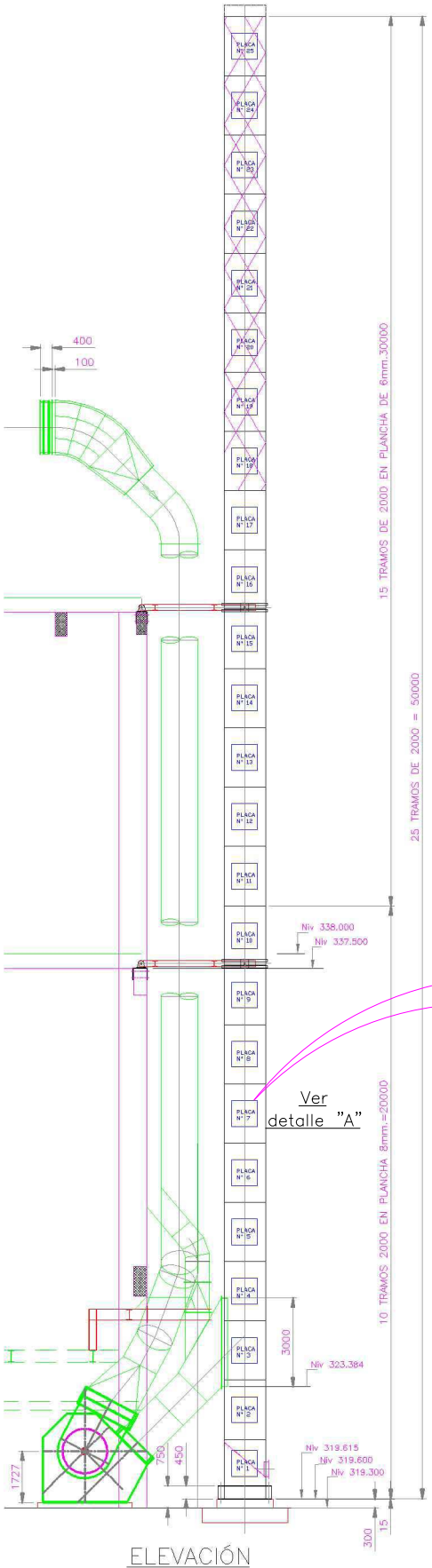
9. Monitorear los sólidos en suspensión que están presentes en los gases de combustión, para determinar el nivel de afectación que pudiera haber en las paredes de la chimenea.

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.

PLANOS



FIMCP-ESPOL		Fecha:	Nombre:
	Dibujó:	14/09/2011	Henry Villón B.
	Revisó:	16/09/2011	Ing. J. Peña E.
PROYECTO: INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA EN UNA PLANTA CEMENTERA			PLANO No.: 01
ESCALA: 1:225	CONTIENE: PLANO GENERAL DE LA CHIMENEA		
	MATERIALES: ACERO A 36		MASA (Kg):



ELEVACIÓN

DETALLE A

FIMCP-ESPOL

	Fecha:	Nombre:
Dibujó:	14/09/2011	Henry Villón B.
Revisó:	16/09/2011	Ing. J. Peña E.

PROYECTO: INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA EN UNA PLANTA CEMENTERA

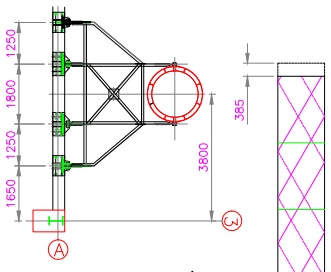
PLANO No.: 02

ESCALA: 1:225

CONTIENE: ZONAS DE MEDICIÓN DE ESPESORES

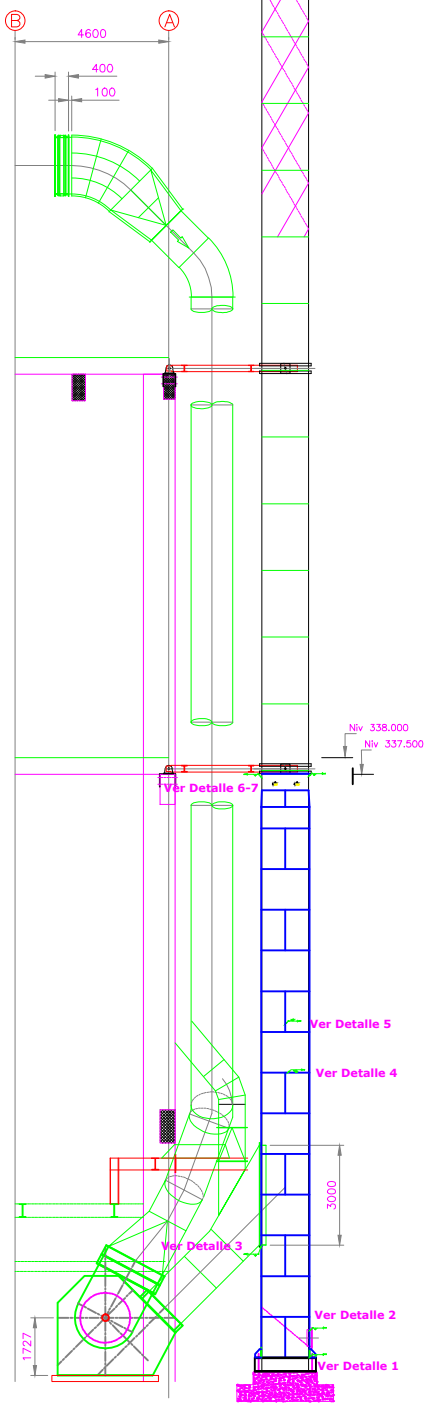
MATERIALES: ACERO A 36

MASA (Kg):



VISTA 2–2'

ESCALA 1 : 100

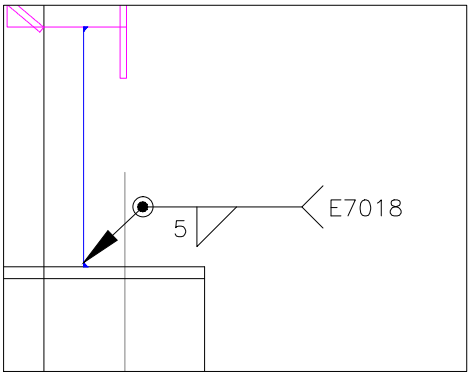


ELEVACIÓN

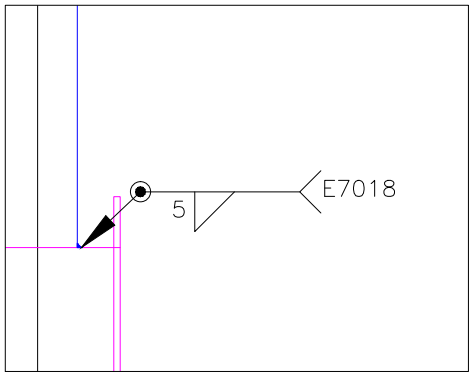
- **El acero a utilizar será ASTM A-588.**
- **La chimenea concéntrica consta de 14 anillos de dos planchas cada uno.**
- **Se deberá aplicar un sistema de pinturas apropiado a la superficie interna concéntrica de la chimenea concéntrica.**

FIMCP-ESPOL		Fecha:	Nombre:
	Dibujó:	07/08/2011	Henry Villón B.
	Revisó:	12/09/2011	Ing. J. Peña E.
PROYECTO: INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA EN UNA PLANTA CEMENTERA		PLANO No.: 03	
ESCALA: 1:225	CONTIENE: CHIMENEA CONCÉNTRICA		
	MATERIALES: ACERO ASTM A-588 ASTM A-36	MASA (Kg):	

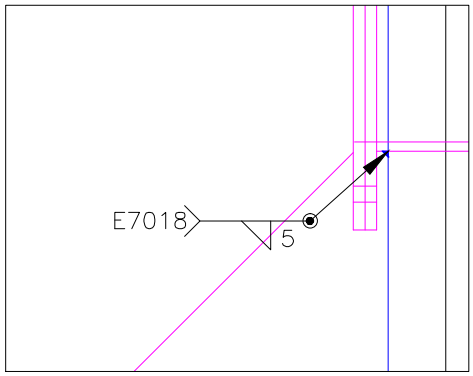
DETALLE 1
BASE



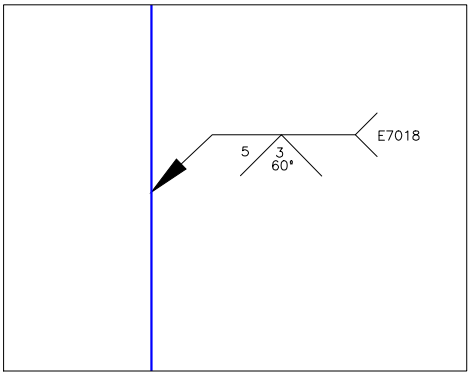
DETALLE 2
MANHOLE



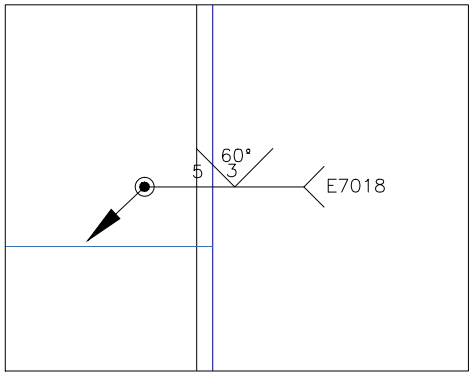
DETALLE 3
ENTRADA DE GASES



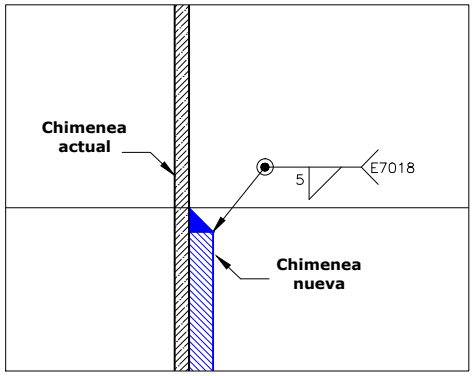
DETALLE 4
SOLDADURA VERTICAL



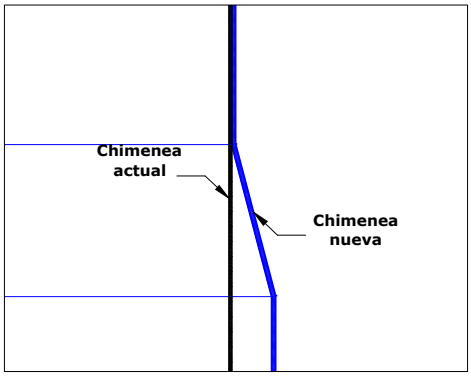
DETALLE 5
SOLDADURA HORIZONTAL



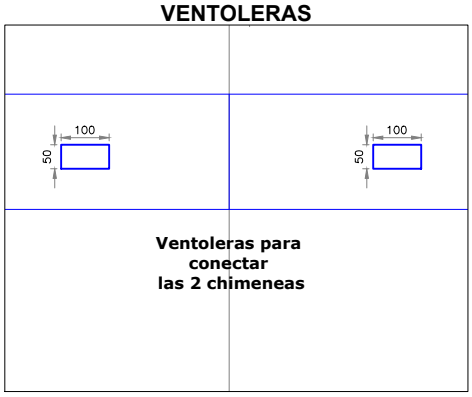
DETALLE 6-A
UNIÓN CON LA NUEVA CHIMENEA



DETALLE 6-B
UNIÓN CON LA NUEVA CHIMENEA

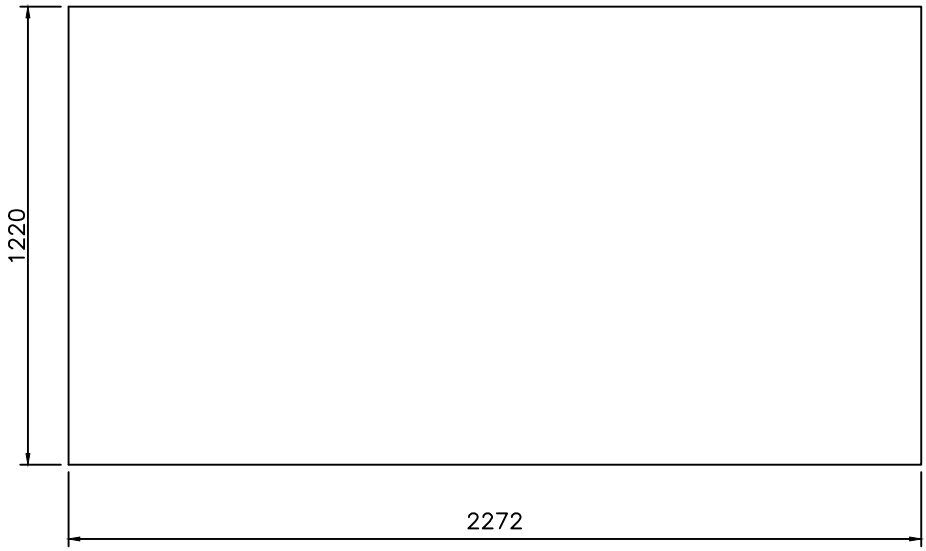


DETALLE 7
VENTOLERAS

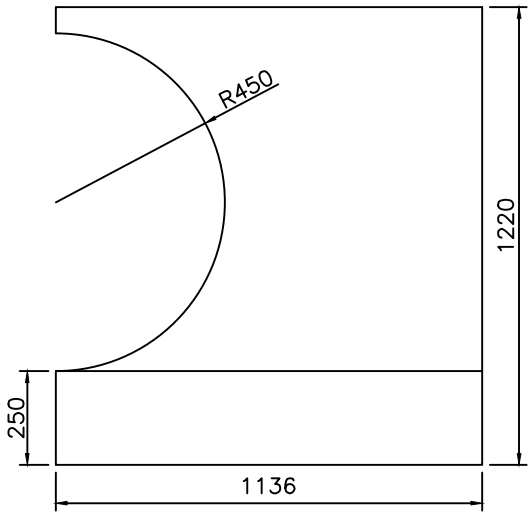


- **El acero a utilizar será ASTM A-588.**
- **La chimenea concéntrica consta de 14 anillos de dos planchas cada uno.**
- **Se deberá aplicar un sistema de pinturas apropiado a la superficie interna concéntrica de la chimenea concéntrica.**

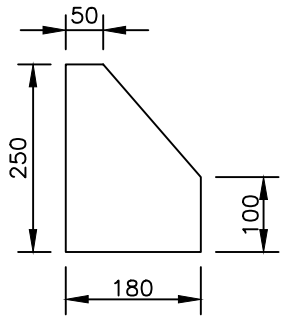
FIMCP-ESPOL		Fecha:	Nombre:
	Dibujó:	07/08/2011	Henry Villón B.
	Revisó:	12/09/2011	Ing. J. Peña E.
PROYECTO: INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA EN UNA PLANTA CEMENTERA			PLANO No.: 04
ESCALA:	CONTIENE: DETALLES DE LAS UNIONES SOLDADAS		
	MATERIALES: ACERO ASTM A-588 ASTM A-36		MASA (Kg):



ESCALA: 1:20
CANTIDAD: 25



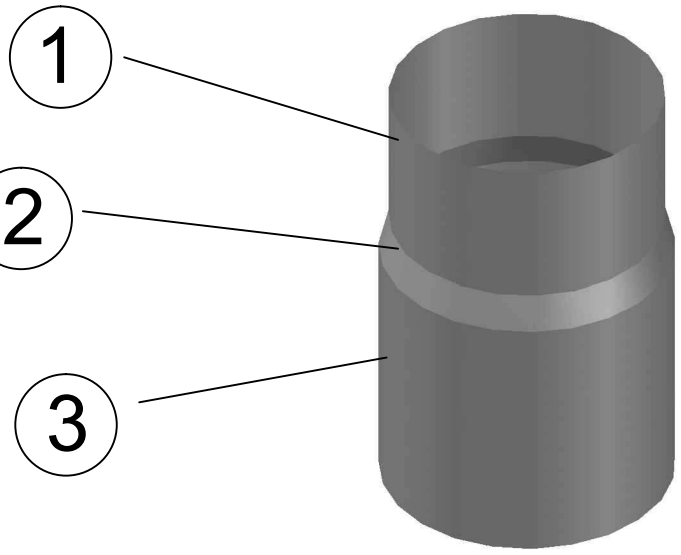
ESCALA: 1:20
CANTIDAD: 2



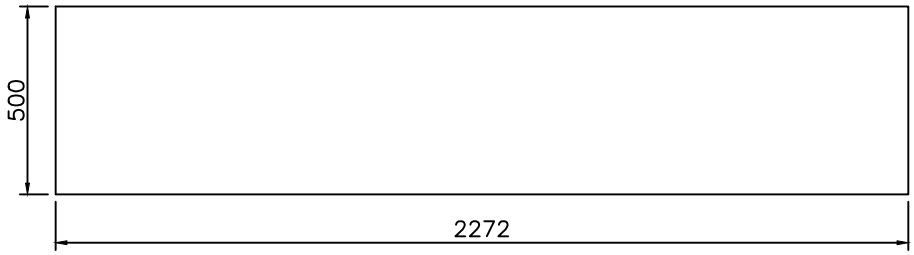
ESCALA: 1:10
CANTIDAD: 8

- **Todas las dimensiones en mm, a menos que se indique lo contrario**
- **Biselar todo el perímetro**

FIMCP-ESPOL		Fecha:	Nombre:
	Dibujó:	07/08/2011	Henry Villón B.
	Revisó:	12/09/2011	Ing. J. Peña E.
PROYECTO: INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA EN UNA PLANTA CEMENTERA		PLANO No.: 05	
ESCALA: Indicada	CONTIENE: PLANO DE CONTRUCCIÓN		
	MATERIALES: ACERO ASTM A-588 ASTM A-36	MASA (Kg):	

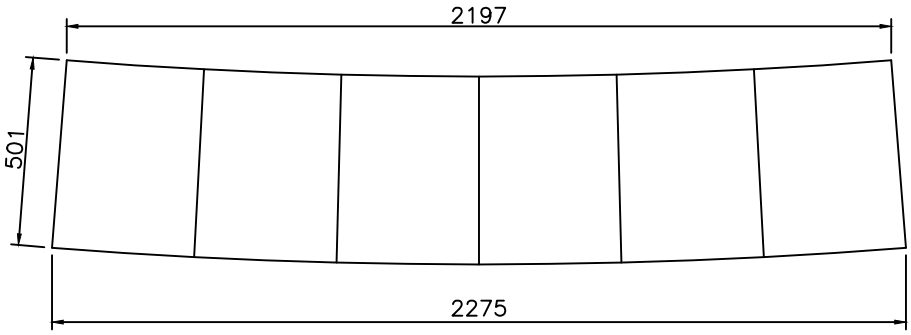


1



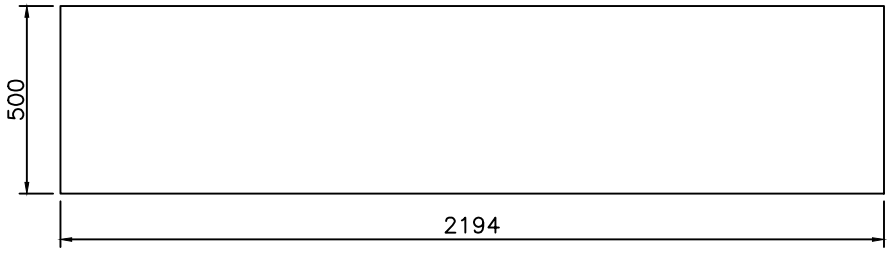
ESCALA: 1:15
CANTIDAD: 2

2



ESCALA: 1:15
CANTIDAD: 2

3



ESCALA: 1:15
CANTIDAD: 2

- **Todas las dimensiones en mm, a menos que se indique lo contrario**
- **Biselar todo el perímetro**

FIMCP-ESPOL		Fecha:	Nombre:
	Dibujó:	07/08/2011	Henry Villón B.
	Revisó:	12/09/2011	Ing. J. Peña E.
PROYECTO: INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA EN UNA PLANTA CEMENTERA		PLANO No.: 06	
ESCALA: Indicada	CONTIENE: PLANO DE CONTRUCCIÓN		
	MATERIALES: ACERO ASTM A-588 ASTM A-36	MASA (Kg):	

APÉNDICES

Apéndice A : Clases de daño de un componente

Apéndice B : Resultados de la simulación del espesor crítico

Apéndice C : Tablas de peso de la chimenea

Apéndice D : Extracto de la norma ASTM A 588/ A 588 M 01

Apéndice E : Extracto de la norma AWS D1.1

Apéndice F : WPS de las zonas a soldar

Apéndice G : Cálculo de la cantidad de electrodos

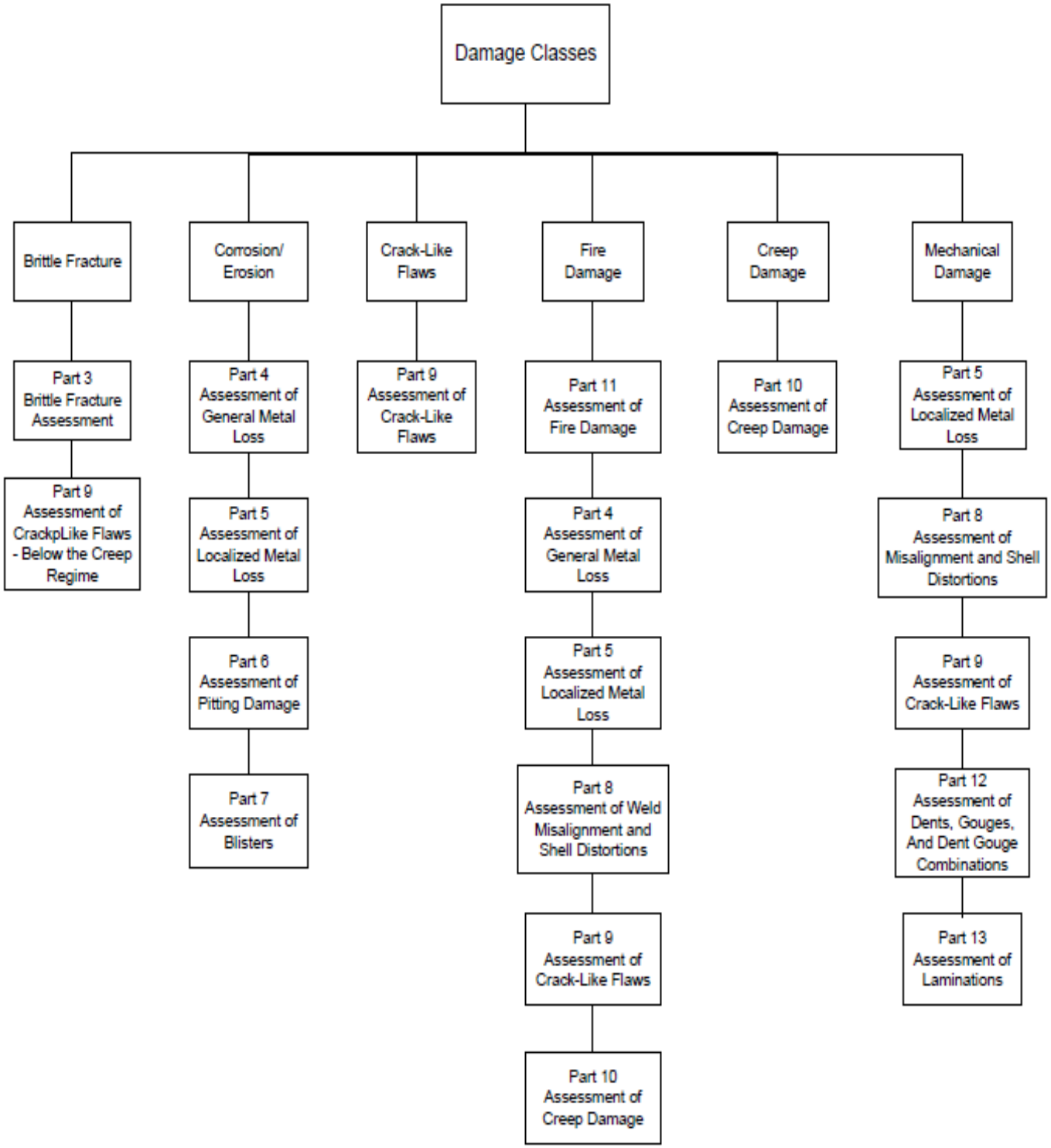
Apéndice H : Especificaciones técnicas de la pintura

Apéndice I : Cálculo de la pintura

Apéndice J : Cálculo de la presión producida por el viento según la norma ASCE 7-05

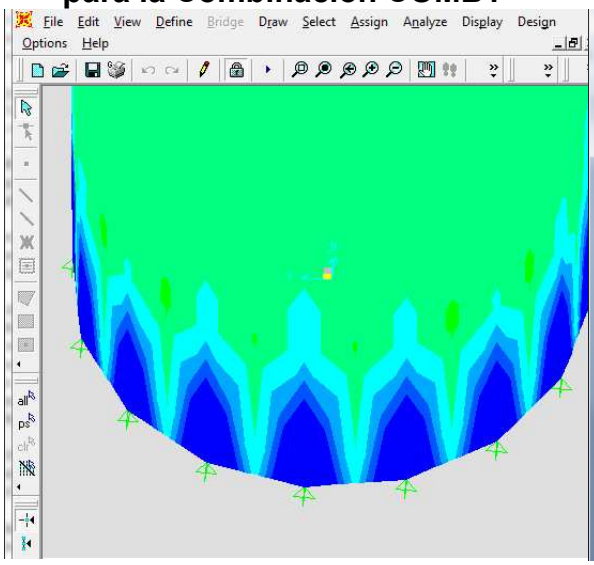
Apéndice K : Espectro de aceleración según el Código Ecuatoriano de la Construcción

APÉNDICE A
CLASES DE DAÑO DE UN COMPONENTE

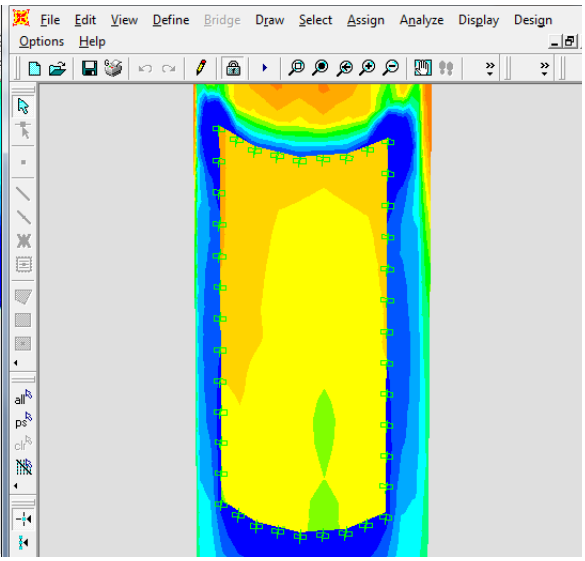

Damage Classes
Brittle Fracture
Part 3 Brittle Fracture Assessment
Part 9 Assessment of CrackpLike Flaws - Below the Creep Regime
Corrosion/ Erosion
Part 4 Assessment of General Metal Loss
Part 5 Assessment of Localized Metal Loss
Part 6 Assessment of Pitting Damage
Part 7 Assessment of Blisters
Crack-Like Flaws
Part 9 Assessment of Crack-Like Flaws
Fire Damage
Part 11 Assessment of Fire Damage
Part 4 Assessment of General Metal Loss
Part 5 Assessment of Localized Metal Loss
Part 8 Assessment of Weld Misalignment and Shell Distortions
Part 9 Assessment of Crack-Like Flaws
Part 10 Assessment of Creep Damage
Creep Damage
Part 10 Assessment of Creep Damage
Mechanical Damage
Part 5 Assessment of Localized Metal Loss
Part 8 Assessment of Misalignment and Shell Distortions
Part 9 Assessment of Crack-Like Flaws
Part 12 Assessment of Dents, Gouges, And Dent Gouge Combinations
Part 13 Assessment of Laminations

APÉNDICE B
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL ESPESOR CRÍTICO

Esfuerzo de Von Mises en el Anclaje para la Combinación COMB1

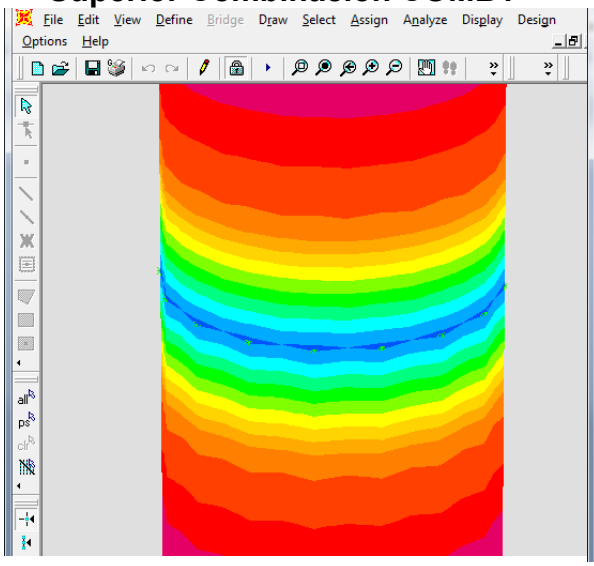


Esfuerzo de Von Mises en la Unión con Tubería Combinación COMB1

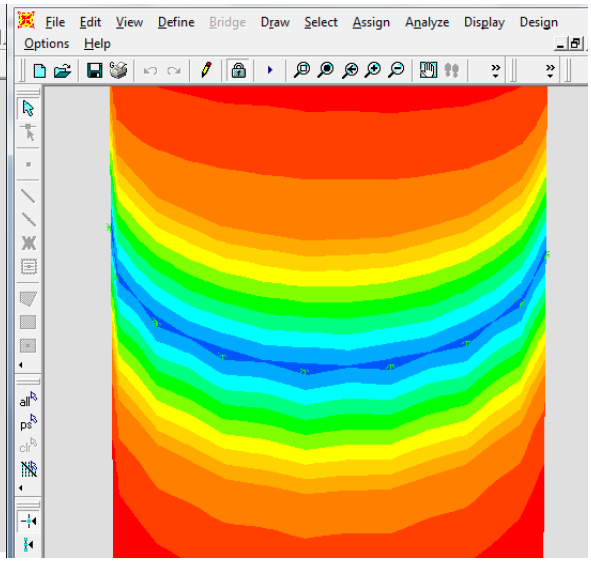


Esfuerzo de Von Mises en el sector de unión de la chimenea con la tubería de descarga de los gases del horno. Los valores en color azul son superiores al Esfuerzo de Fluencia del Acero. Se nota claramente una concentración de esfuerzos en las esquinas.

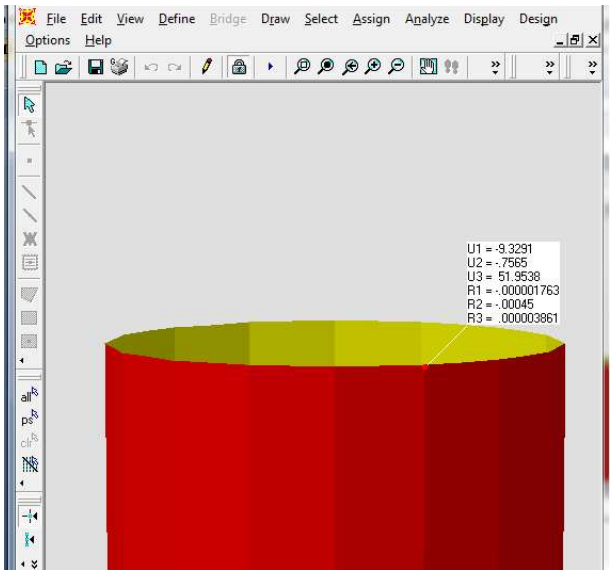
Esfuerzo de Von Mises en el Anillo Superior Combinación COMB1



Esfuerzo de Von Mises en el Anillo Intermedio Combinación COMB1



Desplazamientos Extremo Superior Combinación COMB1



APÉNDICE C
TABLAS DE PESO DE LA CHIMENEA

PESO DE DISEÑO DE LA CHIMENEA

Sección	Altura	Peso Total
	Metros	Kgf
PLANCHA1 (8 mm)	0 - 20	5456.72
PLANCHA 2 (6 mm)	20 - 50	6138.81
Peso Inicial estimado 2003 [Kg]		**11595.53**

PESO A ADICIONAR A LA CHIMENEA ACTUAL

Sección	Espesor chimenea concéntrica	Altura	Peso Total
	mm	m	Kgf
PLANCHA1	5.0	2	357.59
PLANCHA2	5.0	4	357.59
PLANCHA3	5.0	6	357.59
PLANCHA4	5.0	8	357.59
PLANCHA5	5.0	10	357.59
PLANCHA6	5.0	12	357.59
PLANCHA7	5.0	14	357.59
PLANCHA8	5.0	16	357.59
PLANCHA9	5.0	18	357.59
Peso Total a adicionar [Kg]			**3218.334**

PESO ACTUAL DE LA CHIMENEA

Sección	Espesor 2011	Altura	Peso Total
	mm	m	Kgf
PLANCHA1	6.4	2	436.54
PLANCHA2	4.9	4	334.22
PLANCHA3	3.2	6	163.7
PLANCHA4	3.8	8	226.8
PLANCHA5	2.4	10	163.7
PLANCHA6	2.9	12	197.81
PLANCHA7	3.0	14	204.63
PLANCHA8	3.3	16	225.09
PLANCHA9	3.0	18	204.63
PLANCHA10	3.2	20	218.27
PLANCHA11	3.3	22	225.09
PLANCHA12	4.0	24	272.84
PLANCHA13	4.0	26	204.63
PLANCHA14	4.2	28	286.48
PLANCHA15	4.0	30	272.84
PLANCHA16	4.4	32	300.12
PLANCHA17	3.9	34	266.02
PLANCHA18	4.7	36	320.58
PLANCHA19	4.1	38	279.66
PLANCHA20	4.0	40	272.84
PLANCHA21	4.0	42	272.84
PLANCHA22	3.9	44	266.02
PLANCHA23	3.0	46	204.63
PLANCHA24	3.2	48	218.27
PLANCHA25	2.9	50	197.81
Peso Total 2011 [Kg]			**6236.06**

APÉNDICE D
EXTRACTO DE LA NORMA ASTM A 588/ A 588 M 01

COMPOSICIÓN QUÍMICA ASTM A 588

TABLE 1 Chemical Requirements (Heat Analysis)

NOTE 1—Where ". . ." appears in this table, there is no requirement.

Element	Composition, %			
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade K
Carbon	0.19 max	0.20 max	0.15 max	0.17 max
Manganese	0.80–1.25	0.75–1.35	0.80–1.35	0.50–1.20
Phosphorus	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max
Sulfur	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max
Silicon	0.30–0.65	0.15–0.50	0.15–0.40	0.25–0.50
Nickel	0.40 max	0.50 max	0.25–0.50	0.40 max
Chromium	0.40–0.65	0.40–0.70	0.30–0.50	0.40–0.70
Molybdenum	...	...	...	0.10 max
Copper	0.25–0.40	0.20–0.40	0.20–0.50	0.30–0.50
Vanadium	0.02–0.10	0.01–0.10	0.01–0.10	...
Columbium	...	...	...	0.005–0.05[A]

PROPIEDADES MECÁNICAS ASTM A 588

TABLE 2 Tensile Requirements[A]

NOTE 1—Where ". . ." appears in this table, there is no requirement.

	Plates and Bars			Structural Shapes
	For Thicknesses 4 in. [100 mm] and Under	For Thicknesses Over 4 in. [100 mm] to 5 in. [125 mm] incl	For Thicknesses Over 5 in. [125 mm] to 8 in.[200 mm] incl	All Groups[B]
Tensile strength, min,ksi [MPa]	70 [485]	67 [460]	63 [435]	70 [485]
Yield point, min, ksi [MPa]	50 [345]	46 [315]	42 [290]	50 [345]
Elongation in 8 in. [200 mm], min, %	18[C,D]	...	...	18[D]
Elongation in 2 in. [50 mm], min, %	21[C,D]	21[C,D]	21[C,D]	21[E]

APÉNDICE E
EXTRACTO DE LA NORMA AWS D1.1

Table 3.1
Prequalified Base Metal—Filler Metal Combinations for Matching Strength (see 3.3)

Group	Steel Specification Requirements						Filler Metal Requirements		
			Minimum Yield Point/Strength		Tensile Range				
	Steel Specification		ksi	MPa	ksi	MPa	Process	AWS Electrode Specification	Electrode Classification
II	ASTM A 36	(>3/4 in. [20 mm])	36	250	58–80	400–550			
	ASTM A 131	Grades AH32, DH32, EH32	45	315	68–85	470–585			
		Grades AH36, DH36, EH36	51	350	71–90	490–620			
	ASTM A 441		40–50	275–345	60–70	415–485			
	ASTM A 516	Grade 65	35	240	65–85	450–585	SMAW	A5.1	E7015, E7016, E7018, E7028
		Grade 70	38	260	70–90	485–620			
	ASTM A 529	Grade 50	50	345	70–100	485–690		A5.5[c]	E7015-X, E7016-X, E7018-X
		Grade 55	55	380	70–100	485–690			
	ASTM A 537	Class 1	45–50	310–345	65–90	450–620			
	ASTM A 572	Grade 42	42	290	60 min	415 min	SAW	A5.17	F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX
		Grade 50	50	345	65 min	450 min			
		Grade 55	55	380	70 min	485 min		A5.23[c]	F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX
	ASTM A 588[b]	(4 in. [100 mm] and under)	50	345	70 min	485 min			
	ASTM A 595	Grade A	55	380	65 min	450 min			
		Grades B and C	60	415	70 min	480 min			
	ASTM A 606[b]		45–50	310–340	65 min	450 min	GMAW	A5.18	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodes with the -GS suffix shall be excluded)
	ASTM A 618	Grades Ib, II, III	46–50	315–345	65 min	450 min			
	ASTM A 633	Grade A	42	290	63–83	430–570			
		Grades C, D (2-1/2 in. [65 mm] and under)	50	345	70–90	485–620		A5.28[c]	ER70S-XXX, E70C-XXX
	ASTM A 709	Grade 36 (>3/4 in. [20 mm])	36	250	58–80	400–550			
		Grade 50	50	345	65 min	450 min			
		Grade 50W	50	345	70 min	485 min	FCAW	A5.20	E7XT-X, E7XT-XM (Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix shall be excluded and electrodes with the -11 suffix shall be excluded for thicknesses greater than 1/2 in. [12 mm])
		Grade 50S	50–65	345–450	65 min	450 min			
	ASTM A 710	Grade A, Class 2 > 2 in. [50 mm]	55	380	65 min	450 min			
	ASTM A 808	(2-1/2 in. [65 mm] and under)	42	290	60 min	415 min			
	ASTM A 913	Grade 50	50	345	65 min	450 min			
	ASTM A 992		50–65	345–450	65 min	450 min			
	ASTM A 1008 HSLAS	Grade 45 Class 1	45	310	60 min	410 min			
		Grade 45 Class 2	45	310	55 min	380 min			
		Grade 50 Class 1	50	340	65 min	450 min		A5.29[c]	E7XTX-X, E7XTX-XM
		Grade 50 Class 2	50	340	60 min	410 min			
		Grade 55 Class 1	55	380	70 min	480 min			
		Grade 55 Class 2	55	380	65 min	450 min			
	ASTM A 1008 HSLAS-F	Grade 50	50	340	60 min	410 min			

APÉNDICE F
WPS DE LAS ZONAS A SOLDAR

	Fecha de revisión 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-Client:
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 1 De-of 2
WPS No:.-WPS-01	FECHA - Date: 29/07/2011

Company Name/Compañía **ESPOL** Date/fecha 7/29/2011

Welding Procedure Specification/Procedimiento de Soldadura (WPS) WPS-01 Supporting/Soporte PQR N°. PQR-01

Welding Process(es)/Procesos de Soldadura SMAW Type(s)/Tipo Manual Código: ASME IX
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Auto.)

JOINTS/ Juntas (QW-402)

Joint Design/Diseño de la junta Bevel in/ Bisel en V

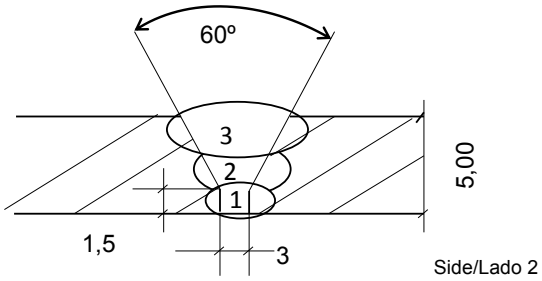
Backing/Respaldo (Yes) __ (No) X

Backing Material/Material de respaldo (Type) Weld Metal

( ) METAL
( ) NO METAL
( ) OTROS

Details/Detalle

Side/Lado 1



Side/Lado 2

BASE METALS/METAL BASE (QW-403)

Base Metal/Metal Base A 588 to/a A 588 P-N° 3 Group N° 1 to/a P-N° 3 Group N° 1

Thickness Range/Rango de Espesores

Base Metal: **A 588** Groove/Ranura 1,6 mm to9,5 mm Fillet/Filete All/Todos

Pipe Dia. Range/Rango diámetro de tube Groove/Ranura All/Todos Fillet/Filete All/Todos

Other/Otros N/A

FILLER METALS/MATERIAL DE SOLDADURA (QW-404)

Spec. N° (SFA) SFA - 5.5

AWS N° (Class) E 7018

F-N° 4

A-N° 2

Size of Filler Metals
tamaño del metal de soldadura 5 mm

Weld Metal/Metal de Soldadura

Thickness Range/Rango de Espesores

Groove Max. 9,5 mm

Fillet Max. All/todos

Electrode - Flux/ Electrodo- Fundente (Class/clase) N/A

Flux Trade Name/Nombre Fabricante del Fundente N/A

Consumable Insert/Inserto Consumible N/A

Other/ Otro N/A

POSITIONS/POSICION (QW-405)

Position/posición(s) of Groove/en Ranura 3G

Welding Progression/Dirección de la Soldadura

Up/Subiendo X Down/Bajando __

Position/posición(s) of Fillet/ en filete All/Todos

POSTWELD HEAT TREATMENT/TRATAMIENTO TERMICO (QW-407)

Temperature Range/Rango de Temperatura N/A

Time Range/Rango de Tiempo N/A

Other/Otros N/A

PREHEAT (QW-406)

Preheat Temp/Temperatura de Precalentamiento Min 15 °C

Interpass Temp/Temperatura entre pases Min 250 °C

Preheat Maintenance/Mantener precalentamiento N/A

GAS/GAS (QW-408)

	Percent Composition/porcentaje de composición Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate
Shielding / Gas de protección	N/A		
Trailing/Arrastre	NR		
Backing/Respaldo	NR		

	Fecha de revisión 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-Client:
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 2 De-of 2
WPS No:.-WPS-01	FECHA - Date: 29/07/2011

ELECTRICAL CHARACTERISTICS/ CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409)

Current/Corriente AC or DC: DC — Polarity/polaridad: EP

Amps/amperios (Range): 70-120 — Volts/Voltios (Range): 20- 30

Tungsten Electrode Size and Type/Electrodo de tusteno Diámetro y Tipo: N/A

Mode of Metal Transfer For/Modo de Transferencia para: GMAW: N/A
(Spray arc, short circuiting arc, etc)

Electrode Wire feed speed range/Rango de la velocidad de alimentación del alambre: N/A

TECHNIQUE/TECNICA (QW-410)

String or Weave Bead/Cordón recto o oscilado: String & Weave/recto y oscilado

Orifice or Gas Cup Size/Orificio o tamaño de la Boquilla: N/A

Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc): Power brushing, and when required grinding

limpieza inical y entre pases(cepillado, pulidora): Cepillado y cuando requiera Pulidora

Method of Back Gouging/método de limpieza de la raíz: Grinding/pulidora

Oscilación/oscilación: N/A

Contact Tube to Work Distance/Distancia de la hasta la pieza de trabajo: N/A

Multiple or Single Pass (per side)/Cordones múltiples o de una capa (por lado): Multiple

Multiple or Single Electrodes/Múltiples o un solo electrodo: Single/un solo

Travel Speed (Range)/Rango de velocidad de avance: 10 - 15 cm/min

Peening/Martillado: N/A

Other/Otros: N/A

Weld Layer(s) Cordones de soldadura		Process Proceso	Filler Metal Metal de Soldadura		Current/ Corriente		Volt Range Rango Voltaje	Travel Speed velocidad Range (cm/min)	Other/Otors
			Class Clases	Ø	Type Polariry Polaridad	Amperage Amperaje Range			
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	70-100	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	2	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	80-120	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	3	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	80-120	20 - 30	10-15	

	REGISTERED BY Registrado por	REVISED BY Revisado por	APPROVED BY Aprobado por
NOMBRE - Name:	**Henry Ronald Villón B.**		
CARGO - Post:			
FIRMA - Signature:			
FECHA - Date:			

	Fecha de revisión 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-Client:
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 1 De-of 2
WPS No:. WPS-02	FECHA - Date: 29/07/2011

Company Name/Compañía **ESPOL** Date/fecha 7/29/2011

Welding Procedure Specification/Procedimiento de Soldadura (WPS) WPS-02 Supporting/Soporte PQR N°. PQR-02

Welding Process(es)/Procesos de Soldadura SMAW Type(s)/Tipo Manual Código: ASME IX
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Auto.)

JOINTS/ Juntas (QW-402)

Joint Design/Diseño de la junta Esquina

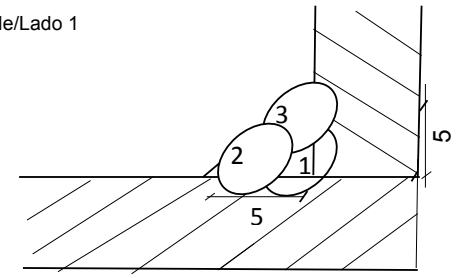
Backing/Respaldo (Yes) __ (No) X

Backing Material/Material de respaldo (Type) Weld Metal

(X) METAL
( ) NO METAL
( ) OTROS

Details/Detalle

Side/Lado 1



Side/Lado 2

BASE METALS/METAL BASE (QW-403)

Base Metal/Metal Base A 588 to/a A 36 P-N° 3 Group N° 1 to/a P-N° 1 Group N° 1

Thickness Range/Rango de Espesores

Base Metal: **A 588** Groove/Ranura 1,6 mm to 9,5 mm Fillet/Filete All/Todos

Pipe Dia. Range/Rango diámetro de tubería Groove/Ranura All/Todos Fillet/Filete All/Todos

Other/Otros N/A

FILLER METALS/MATERIAL DE SOLDADURA (QW-404)

Spec. N° (SFA) SFA - 5.5

AWS N° (Class) E 7018

F-N° 4

A-N° 2

Size of Filler Metals
tamaño del metal de soldadura 5 mm

Weld Metal/Metal de Soldadura

Thickness Range/Rango de Espesores

Groove Max. 9,5 mm

Fillet Max. All/todos

Electrode - Flux/ Electrodo- Fundente (Class/clase) N/A

Flux Trade Name/Nombre Fabricante del Fundente N/A

Consumable Insert/Inserto Consumible N/A

Other/ Otro N/A

POSITIONS/POSICION (QW-405)

Position/posición(s) of Groove/en Ranura 3G

Welding Progression/Dirección de la Soldadura

Up/Subiendo X Down/Bajando __

Position/posición(s) of Fillet/ en filete All/Todos

POSTWELD HEAT TREATMENT/TRATAMIENTO TERMICO (QW-407)

Temperature Range/Rango de Temperatura N/A

Time Range/Rango de Tiempo N/A

Other/Otros N/A

PREHEAT (QW-406)

Preheat Temp/Temperatura de Precalentamiento Min 15 °C

Interpass Temp/Temperatura entre pases Min 250 °C

Preheat Maintenance/Mantener precalentamiento N/A

GAS/GAS (QW-408)

	Percent Composition/porcentaje de composición Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate
Shielding / Gas de protección	N/A		
Trailing/Arrastre	NR		
Backing/Respaldo	NR		

	Fecha de revisión 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-Client:
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 2 De-of 2
WPS No:. WPS-02	FECHA - Date: 29/07/2011

ELECTRICAL CHARACTERISTICS/ CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409)

Current/Corriente AC or DC DC Polarity/polaridad EP

Amps/amperios (Range) 100-150 Volts/Voltios (Range) 20- 30

Tungsten Electrode Size and Type/Electrodo de tusteno Diámetro y Tipo N/A

Mode of Metal Transfer For/Modo de Transferencia para: GMAW N/A
(Spray arc, short circuiting arc, etc)

Electrode Wire feed speed range/Rango de la velocidad de alimentación del alambre N/A

TECHNIQUE/TECNICA (QW-410)

String or Weave Bead/Cordón recto o oscilado String & Weave/recto y oscilado

Orifice or Gas Cup Size/Orificio o tamaño de la Boquilla N/A

Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc) Power brushing, and when required grinding

limpieza inical y entre pases(cepillado, pulidora) Cepillado y cuando requiera Pulidora

Method of Back Gouging/método de limpieza de la raíz Grinding/pulidora

Oscilación/oscilación N/A

Contact Tube to Work Distance/Distancia de la hasta la pieza de trabajo N/A

Multiple or Single Pass (per side)/Cordones múltiples o de una capa (por lado) Multiple

Multiple or Single Electrodes/Múltiples o un solo electrodo Single/un solo

Travel Speed (Range)/Rango de velocidad de avance 10 - 15 cm/min

Peening/Martillado N/A

Other/Otros N/A

Weld Layer(s) Cordones de soldadura		Process Proceso	Filler Metal Metal de Soldadura		Current/ Corriente		Volt Range Rango Voltaje	Travel Speed velocidad Range (cm/min)	Other/Otors
			Class Clases	Ø	Type Polariry Polaridad	Amperage Amperaje Range			
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	100-150	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	100-150	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	100-150	20 - 30	10-15	

	REGISTERED BY Registrado por	**REVISED BY** Revisado por	**APPROVED BY** Aprobado por
NOMBRE - Name:			
CARGO - Post:			
FIRMA - Signature:			
FECHA - Date:			

	Fecha de revisión 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-Client:
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 1 De-of 2
WPS No:.WPS-03	FECHA - Date: 29/07/2011

Company Name/Compañía **ESPOL** Date/fecha 7/29/2011

Welding Procedure Specification/Procedimiento de Soldadura (WPS) WPS-03 Supporting/Soporte PQR N°. PQR-03

Welding Process(es)/Procesos de Soldadura SMAW Type(s)/Tipo Manual Código: ASME IX
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Auto.)

JOINTS/ Juntas (QW-402)

Joint Design/Diseño de la junta Bevel in/ Bisel en V

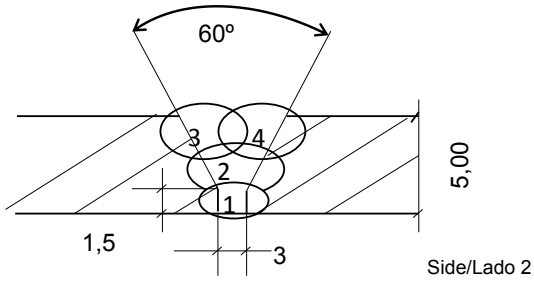
Backing/Respaldo (Yes) _ (No) X

Backing Material/Material de respaldo (Type) Weld Metal

( ) METAL
( ) NO METAL
( ) OTROS

Details/Detalle

Side/Lado 1



Side/Lado 2

BASE METALS/METAL BASE (QW-403)

Base Metal/Metal Base A 588 to/a A 588 P-N° 3 Group N° 1 to/a P-N° 3 Group N° 1

Thickness Range/Rango de Espesores

Base Metal: **A 588** Groove/Ranura 1,6 mm to 9,5 mm Fillet/Filete All/Todos

Pipe Dia. Range/Rango diámetro de tubería Groove/Ranura All/Todos Fillet/Filete All/Todos

Other/Otros N/A

FILLER METALS/MATERIAL DE SOLDADURA (QW-404)

Spec. N° (SFA) SFA - 5.5

AWS N° (Class) E 7018

F-N° 4

A-N° 2

Size of Filler Metals / tamaño del metal de soldadura 3.2 - 5 mm

Weld Metal/Metal de Soldadura

Thickness Range/Rango de Espesores

Groove Max. 9,5 mm

Fillet Max. All/todos

Electrode - Flux/ Electrodo- Fundente (Class/clase) N/A

Flux Trade Name/Nombre Fabricante del Fundente N/A

Consumable Insert/Inserto Consumible N/A

Other/ Otro N/A

POSITIONS/POSICION (QW-405)

Position/posición(s) of Groove/en Ranura 2G

Welding Progression/Dirección de la Soldadura

Up/Subiendo _ Down/Bajando _

Position/posición(s) of Fillet/ en filete All/Todos

POSTWELD HEAT TREATMENT/TRATAMIENTO TERMICO (QW-407)

Temperature Range/Rango de Temperatura N/A

Time Range/Rango de Tiempo N/A

Other/Otros N/A

PREHEAT (QW-406)

Preheat Temp/Temperatura de Precalentamiento Min 15 °C

Interpass Temp/Temperatura entre pases Min 250 °C

Preheat Maintenance/Mantener precalentamiento N/A

GAS/GAS (QW-408)

	Percent Composition/porcentaje de composición Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate
Shielding / Gas de protección	N/A		
Trailing/Arrastre	NR		
Backing/Respaldo	NR		

	Fecha de revisión 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-Client:
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 2 De-of 2
WPS No:.WPS-03	FECHA - Date: 29/07/2011

ELECTRICAL CHARACTERISTICS/ CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409)

Current/Corriente AC or DC: DC — Polarity/polaridad: EP

Amps/amperios (Range): 70-120 — Volts/Voltios (Range): 20- 30

Tungsten Electrode Size and Type/Electrodo de tusteno Diámetro y Tipo: N/A

Mode of Metal Transfer For/Modo de Transferencia para: GMAW: N/A
(Spray arc, short circuiting arc, etc)

Electrode Wire feed speed range/Rango de la velocidad de alimentación del alambre: N/A

TECHNIQUE/TECNICA (QW-410)

String or Weave Bead/Cordón recto o oscilado: String & Weave/recto y oscilado

Orifice or Gas Cup Size/Orificio o tamaño de la Boquilla: N/A

Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc): Power brushing, and when required grinding

limpieza inical y entre pases(cepillado, pulidora): Cepillado y cuando requiera Pulidora

Method of Back Gouging/método de limpieza de la raíz: Grinding/pulidora

Oscilación/oscilación: N/A

Contact Tube to Work Distance/Distancia de la hasta la pieza de trabajo: N/A

Multiple or Single Pass (per side)/Cordones múltiples o de una capa (por lado): Multiple

Multiple or Single Electrodes/Múltiples o un solo electrodo: Single/un solo

Travel Speed (Range)/Rango de velocidad de avance: 10 - 15 cm/min

Peening/Martillado: N/A

Other/Otros: N/A

Weld Layer(s) Cordones de soldadura		Process Proceso	Filler Metal Metal de Soldadura		Current/ Corriente		Volt Range Rango Voltaje	Travel Speed velocidad Range (cm/min)	Other/Otors
			Class Clases	Ø	Type Polariry Polaridad	Amperage Amperaje Range			
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	70-120	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	2	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	80-120	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	3	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	80-120	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	4	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	80-120	20 - 30	10-15	

	REGISTERED BY Registrado por	REVISED BY Revisado por	APPROVED BY Aprobado por
NOMBRE - Name:			
CARGO - Post:			
FIRMA - Signature:			
FECHA - Date:			

	Fecha de revisión 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 1 De-of 2
WPS No:.WPS-04	FECHA - Date: 29/07/2011

Company Name/Compañía **ESPOL** Date/fecha 7/29/2011

Welding Procedure Specification/Procedimiento de Soldadura (WPS) WPS-06 Supporting/Soporte PQR N°. PQR-04

Welding Process(es)/Procesos de Soldadura SMAW Type(s)/Tipo Manual Código: ASME IX
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Auto.)

JOINTS/ Juntas (QW-402)

Joint Design/Diseño de la junta Traslape

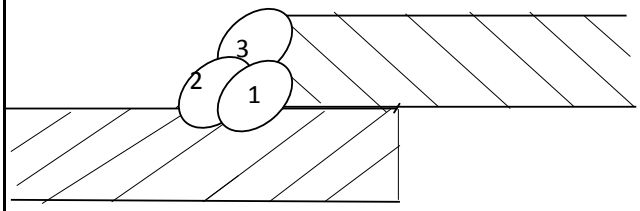
Backing/Respaldo (Yes) _ (No) X

Backing Material/Material de respaldo (Type) Weld Metal

( ) METAL
( ) NO METAL
( ) OTROS

Details/Detalle

Side/Lado 1



Side/Lado 2

BASE METALS/METAL BASE (QW-403)

Base Metal/Metal Base A 588 to/a A 36 P-N° 3 Group N° 1 to/a P-N° 1 Group N° 1

Thickness Range/Rango de Espesores

Base Metal: **A 588** Groove/Ranura 1,6 mm to 9,5 mm Fillet/Filete All/Todos

Pipe Dia. Range/Rango diámetro de tubería Groove/Ranur All/Todos Fillet/Filete All/Todos

Other/Otros N/A

FILLER METALS/MATERIAL DE SOLDADURA (QW-404)

Spec. N° (SFA) SFA - 5.5

AWS N° (Class) E 7018

F-N° 4

A-N° 2

Size of Filler Metals
tamaño del metal de soldadura 5 mm

Weld Metal/Metal de Soldadura

Thickness Range/Rango de Espesores

Groove Max. 9,5 mm

Fillet Max. All/Todos

Electrode - Flux/ Electrodo- Fundente (Class/clase) N/A

Flux Trade Name/Nombre Fabricante del Fundente N/A

Consumable Insert/Inserto Consumible N/A

Other/ Otro N/A

POSITIONS/POSICION (QW-405)

Position/posición(s) of Groove/en Ranura N/A

Welding Progression/Dirección de la Soldadura

Up/Subiendo _ Down/Bajando _

Position/posición(s) of Fillet/ en filete 2F

POSTWELD HEAT TREATMENT/TRATAMIENTO TERMICO (QW-407)

Temperature Range/Rango de Temperatura N/A

Time Range/Rango de Tiempo N/A

Other/Otros N/A

PREHEAT (QW-406)

Preheat Temp/Temperatura de Precalentamiento Min 15 °C

Interpass Temp/Temperatura entre pases Min 250 °C

Preheat Maintenance/Mantener precalentamiento N/A

GAS/GAS (QW-408)

Percent Composition/porcentaje de composición

	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate
Shielding Gas de protección	N/A		
Trailing/Arrastre	NR		
Backing/Respaldo	NR		

	Fecha de revision 29-07-2011	Rev. 0

PROYECTO/Project:
Análisis de la Integridad Estructural de una Chimenea en una Planta Cementera

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS
ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

CONTRATO -	CLIENTE-
REG. NO.:	PAGINA-Page No. 2 De-of 2
WPS No:.WPS-04	FECHA - Date: 29/07/2011

ELECTRICAL CHARACTERISTICS/ CARACTERISTICAS ELECTRICAS (QW-409)

Current/Corriente AC or DC DC Polarity/polaridad EP

Amps/amperios (Range) 100-150 Volts/Voltios (Range) 20- 30

Tungsten Electrode Size and Type/Electrodo de tusteno Diámetro y Tipo N/A

Mode of Metal Transfer For/Modo de Transferencia para: GMAW N/A
(Spray arc, short circuiting arc, etc)

Electrode Wire feed speed range/Rango de la velocidad de alimentación del alambre N/A

TECHNIQUE/TECNICA (QW-410)

String or Weave Bead/Cordón recto o oscilado String & Weave/recto y oscilado
Orifice or Gas Cup Size/Orificio o tamaño de la Boquilla N/A
Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc) Power brushing, and when required grinding
limpieza inical y entre pases(cepillado, pulidora) Cepillado y cuando requiera Pulidora
Method of Back Gouging/método de limpieza de la raíz Grinding/pulidora
Oscilación/oscilación N/A
Contact Tube to Work Distance/Distancia de la hasta la pieza de trabajo N/A
Multiple or Single Pass (per side)/Cordones múltiples o de una capa (por lado) Multiple
Multiple or Single Electrodes/Múltiples o un solo electrodo Single/un solo
Travel Speed (Range)/Rango de velocidad de avance 10 - 15 cm/min
Peening/Martillado N/A
Other/Otros N/A

Weld Layer(s) Cordones de soldadura		Process Proceso	Filler Metal Metal de Soldadura		Current/ Corriente		Volt Range Rango Voltaje	Travel Speed velocidad Range (cm/min)	Other/Otors
			Class Clases	Ø	Type Polariry Polaridad	Amperage Amperaje Range			
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	100-150	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	100-150	20 - 30	10-15	
Side/Lado 1	1	SMAW	E 7018	3.2 mm	DC+	100-150	20 - 30	10-15	

	REGISTERED BY Registrado por	**REVISED BY** Revisado por	**APPROVED BY** Aprobado por
NOMBRE - Name:			
CARGO - Post:			
FIRMA - Signature:			
FECHA - Date:			

APÉNDICE G
CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE ELECTRODOS

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE SOLDADURA

Para el cálculo de la soldadura, el primer paso a seguir es definir el proceso a utilizar es SMAW, como ya se definió en los WPS.

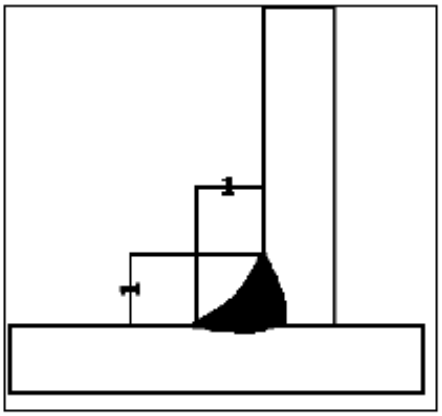
La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$Cant.de\ soldadura = \frac{Peso * Longitud}{Eficiencia\ del\ consumible}$$

El peso por metro lineal de lo que se va a depositar en la soldadura, se escoge de la siguiente tabla en función del diámetro del electrodo y el tipo de junta a utilizar respectivamente.

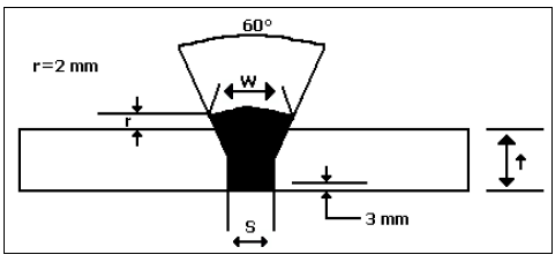
Medida del pie Pulgada / milímetro	Peso de los electrodos requeridos* (Aproximadamente)		Acero depositado	
	Libras por pie lineal	Kgs. Por mt lineal	Libras por pie lineal	Kgs. Por pie lineal
1/8 - 3.175	0,048	0,072	0,027	0,039
3/16 - 4.763	0,113	0,167	0,063	0,092
1/4 - 6.350	0,189	0,322	0,106	0,157
5/16 - 7.938	0,296	0,439	0,166	0,246
3/8 - 9.525	0,427	0,634	0,239	0,354
1/2 - 12.7	0,760	1,134	0,425	0,633
5/8 - 15.875	1,185	1,764	0,663	0,987
3/4 - 19.05	1,705	2,535	0,955	1,42
1 - 25.4	3,030	4,506	1,698	2,525

*Incluye despuntes y perdidas por salpicaduras.
*Incluye colilla y perdida por salpicaduras.



PESO POR METRO LINEAL; UNIÓN A FILETE

Dimensiones de la Unión (en Pulgs.)			Kilos del electrodo por metro lineal de soldadura* (aprox.)	Kilos de acero depositado por metro lineal
t	W	s	Con refuerzo* *	Con refuerzo* *
1/4	0.207	1/16	0,373	0,213
5/16	0.311	3/32	0,685	0,384
3/8	0.414	1/8	1,04	0,587
1/2	0.558	1/8	1,714	0,955
5/8	0.702	1/8	2,500	1,403
3/4	0.847	1/8	3,501	1,966
1	1.138	1/8	5,960	3,376



PESO POR METRO LINEAL; UNIÓN A TOPE CON BISEL EN “V”

Para seleccionar la eficiencia del consumible (electrodo), se selecciona de la siguiente tabla; lo cual se lo hace en función del electrodo y el diámetro del mismo.

7018 hasta 12018			
DIA	AMP	DEP Kg/Hr	EFIC %
3/32	70	0.62	70.5
	90	0.75	66.3
	110	0.79	74.4
1/8	120	1.17	71.6
	140	1.25	70.9
	160	1.36	68.1
5/32	140	1.41	75.0
	170	1.72	73.5
	200	1.96	73.0
3/16	200	2.20	76.4
	250	2.44	74.6
	300	2.55	70.3
1/4	300	3.51	78.0
	350	3.94	77.0
	400	4.11	74.0

EFICIENCIA DEL CONSUMIBLE

Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

CANTIDAD DE SOLDADURA A UTILIZAR

		Bisel "V"	Filete
Peso de material depositado [Kg]		0.373	0.322
Longitud [m]		110	25
Eficiencia de Consumible [%]		0.716	0.716
Cantidad electrodos en Kg	$\frac{Peso * Longitud}{Eficiencia\ del\ consumible}$	57	11.2
TOTAL [Kg]		**69**	

APÉNDICE H
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PINTURA

SIGMACOVER 435

Globally Available

5 páginas

Septiembre 2009
Revisión de Septiembre 2005

DESCRIPCION

revestimiento repintable de alto espesor de dos componentes epoxy curado con poliamida con pigmento de óxido de hierro micáceo

PRINCIPALES CARACTERISTICAS

- revestimiento de alto espesor epoxy multifuncional o acabado con sistemas de protección para estructuras de acero y hormigón expuestas a condiciones terrestres o marinas
- fácil aplicación, con pistola sin aire y brocha
- cura incluso a temperaturas de hasta -10°C
- una humedad relativa alta máxima 95% durante la aplicación y el curado, no influye en la calidad del revestimiento
- buena adherencia sobre la mayoría de los revestimientos envejecidos alquídicos, clorocaucho y epoxy
- puede repintarse con varios revestimientos de dos componentes y convencionales incluso después de largos periodos al aire libre
- resistente a salpicaduras de productos químicos suaves
- excelente durabilidad
- duro, mantiene la flexibilidad a largo plazo
- resistente a temperaturas hasta 200°C (ver ficha de sistema 4062)

COLORES Y BRILLO

gris claro, ligero brillo metálico - satinado

DATOS BASICOS A 20°C

(1 g/cm³ = 8,25 lb/US gal; 1 m²/l = 40,7 ft²/US gal)
(datos para producto mezclado)

Densidad	1,4 g/cm³
Volumen de sólidos	63 ± 2%
VOC (suministro)	máx. 241 g/kg (Directiva 1999/13/EC, SED) máx. 344 g/l (aprox. 2,9 lb/gal)
Espesor de película seca recomendado	75 - 150 micras dependiendo del sistema
Rendimiento teórico	6,3 m²/l para 100 micras *
Secado al tacto	2 horas
Intervalo de repintado	mín. 3 horas * máx. sin límite
Tiempo de curado	4 días *
	(datos por componentes)
Estabilidad del envase (lugar frío y seco)	al menos 24 meses

* ver datos adicionales

SIGMACOVER 435

Septiembre 2009

CONDICIONES RECOMENDADAS DEL SUBSTRATO Y TEMPERATURA

- acero; chorreado según ISO-Sa2½, perfil de rugosidad 40 - 70 micras
- acero con imprimación de taller del tipo silicato de zinc aprobado; preparación de superficies según SPSS ó limpieza con cepillo mecánico según SPSS-Pt3
- capa anterior, seca y sin contaminación
- durante la aplicación y curado se puede dar una temperatura de hasta -10°C siempre que el substrato esté seco y sin hielo
- la temperatura del substrato debe estar al menos 3°C por encima del punto de rocío

ESPECIFICACION DE SISTEMA marinas — fichas de sistemas: 3102, 3103

INSTRUCCIONES DE USO

proporción de mezcla en volumen: base a endurecedor 82 : 18

- la temperatura de la mezcla entre la base y el endurecedor debería ser preferiblemente superior a 10°C, si no podría ser necesario disolvente adicional para obtener viscosidad de aplicación
- un exceso de disolvente reduce su resistencia a los descuelgues
- de ser necesario, se debe añadir el disolvente después de mezclar los componentes

Tiempo de inducción	ninguno
Vida de la mezcla	6 horas a 20°C * ver datos adicionales

PISTOLA SIN AIRE

Disolvente recomendado	Thinner 91-92
Volumen de disolvente	5 - 10%, dependiendo del espesor especificado y las condiciones de aplicación
Orificio de boquilla	aprox. 0,48 - 0,58 mm (= 0,019 - 0,023 in)
Presión de boquilla	15 MPa (= aprox. 150 bar; 2130 p.s.i.)

PISTOLA CON AIRE

Disolvente recomendado	Thinner 91-92
Volumen de disolvente	5 - 10%, dependiendo del espesor especificado y las condiciones de aplicación
Orificio de boquilla	1,5 - 3 mm
Presión de boquilla	0,3 - 0,4 MPa (= aprox. 3 - 4 bar; 43 - 57 p.s.i.)

BROCHA/RODILLO

Disolvente recomendado	Thinner 91-92
Volumen de disolvente	0 - 5%

DISOLVENTE DE LIMPIEZA Thinner 90-53

SIGMACOVER 435

Septiembre 2009

PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

para pintura y disolventes recomendados, ver fichas de seguridad 1430, 1431 y ficha de seguridad del producto

es una pintura base disolvente y se debe evitar la inhalación de la niebla atomizada o vapor, al igual que el contacto de la pintura húmeda con la piel y los ojos

DATOS ADICIONALES

Espesor de película seca y rendimiento

rendimiento teórico m²/l	8,4	6,3	4,2
espesor en micras secas	75	100	150

espesor máximo a brocha: 75 micras secas

Tabla de repintado para espesores hastas 150 micras

para SigmaCover 435, SigmaCover 456

temperatura del substrato	-5°C	5°C	10°C	20°C	30°C	40°C
intervalo mínimo	36 horas	10 horas	4 horas	3 horas	2 horas	2 horas
intervalo máximo	sin límite					

– la superficie debe estar limpia y sin caleo ni ningún tipo de contaminación

Tabla de repintado para espesores hastas 150 micras

para Sigma Vikote 46, SigmaDur 550, SigmaDur 520 y Sigmarine 40

temperatura del substrato	-5°C	5°C	10°C	20°C	30°C	40°C
intervalo mínimo	72 horas	24 horas	16 horas	8 horas	5 horas	3 horas
intervalo máximo	sin límite					

– la superficie debe estar limpia y sin caleo ni ningún tipo de contaminación
– el acabado necesita una capa inferior apropiada
– SigmaCover 435 no debe repintarse con un revestimiento epoxy alquitrán brea

SIGMACOVER 435

Septiembre 2009

Tabla de curado con espesor de 150 micras

temperatura del substrato	seco para manipulación	curado completo
-10°C	24 - 48 horas	20 días
-5°C	24 - 30 horas	14 días
0°C	18 - 24 horas	10 días
5°C	18 horas	8 días
10°C	12 horas	6 días
15°C	8 horas	5 días
20°C	6 horas	4 días
30°C	4 horas	3 días
40°C	3 horas	2 días

– es necesario una buena ventilación durante la aplicación y curado (ver fichas informativas 1433 y 1434)

Vida de la mezcla (a la viscosidad de aplicación)

10°C	12 horas
20°C	6 horas
30°C	4 horas
40°C	2 horas

Disponibilidad mundial

Aunque el objetivo de PPG Protective & Marine Coatings es siempre suministrar la misma calidad de producto en todo el mundo, a veces son necesarias pequeñas modificaciones del mismo, para ajustarse a las normativas locales o nacionales. En estás circunstancias se utilizan fichas técnicas alternativas.

REFERENCIAS

Explicación de fichas técnicas de productos	ver ficha informativa 1411
Precauciones de seguridad	ver ficha informativa 1430
Seguridad para la salud en espacios reducidos	
Peligros de exposición y toxicidad	ver ficha informativa 1431
Seguridad del trabajo en espacios reducidos	ver ficha informativa 1433
Directrices para el uso de la ventilación	ver ficha informativa 1434

SIGMACOVER 435

Septiembre 2009

LIMITACIÓN DE RESPONSABILIDAD

La información de la ficha técnica está basada en los ensayos de laboratorio que creemos son los necesarios y nuestra intención es que sirvan solamente como guía. Toda recomendación o sugerencia relativa al uso de los productos Sigma Coatings fabricados por PPG Protective & Marine Coatings, sea en documentación técnica, o en respuesta a preguntas específicas, o por otro medio, está basada en datos sobre nuestro mejor conocimiento y fiabilidad. Los productos y la información están pensados en condiciones de uso conocidas, según requisitos y nuestra experiencia, pero es responsabilidad del usuario final determinar la conveniencia del producto para el uso final requerido.

PPG Protective & Marine Coatings no tiene control sobre la calidad y condiciones del substrato, ni de los muchos factores que afectan a la aplicación y uso del producto. PPG Protective & Marine Coatings, por tanto, no acepta ninguna responsabilidad originada, ni perjuicios o daños que resulten tanto del uso como del contenido de está ficha técnica (al menos que existan acuerdos establecidos y escritos).

Los datos de la ficha son susceptibles de modificación como resultado de la experiencia práctica y el continuo desarrollo del producto.
Esta ficha de datos reemplaza y anula todas las emisiones previas anteriores y es por lo tanto, responsabilidad del usuario comprobar que esta ficha es la última edición antes del uso del producto.

En el caso de cualquier disparidad o disputa en la traducción de este documento, el texto original en Inglés será el que prevalece.

	PDS	7465
179025	gris claro	9553052200
179496	gris oscuro	9558052200

APÉNDICE I
CÁLCULO DE LA PINTURA

CÁLCULO DE PINTURA

Como la chimenea se la va a pintar por la parte interior (las planchas serán pintadas antes de ser soldadas), se aplicará un sistema de pintura conformado por tres capas con un espesor final de capa seca de 180 µm, por este motivo se optó por que cada capa tenga un espesor de capa seca de 60 µm.

Se debe calcular el espesor de capa húmeda, para poder controlar al operador que va aplicar la pintura y de esta forma no se desperdicie pintura, el cual es de **95.2 µm.**

$$W_{ft} = \frac{D_{ft} * 100}{\%SV} = \frac{(60)(100)}{63} = 95.2\ \mu m$$

Debido a que la pintura que se va aplicar tiene un 63 % de sólidos por volumen, se debe calcular el rendimiento que va tener la pintura, para lo cual realizamos lo siguiente:

$$Rend. = \frac{SV * 10}{D_{ft}} = \frac{(63)(10)}{60} = 10.5\ \frac{m^2}{Lt}$$

Pero este rendimiento se lo debe multiplicar por unos factores de corrección de condiciones de la estructura y de aplicación que se presentan a continuación.

$$F_a = 0.85$$

$$F_s = 0.9$$

Por lo tanto el rendimiento práctico es de:

$$Rp. = Rend * Fa * Fa = (10.5)(0.85)(0.9) = 8.03\ \frac{m^2}{Lt}$$

Como necesitamos conocer cuántos litros de pintura se necesita para pintar toda la chimenea, se tiene que dividir el área de la misma (60 m^2) para el rendimiento práctico que se calculó anteriormente.

$$Nº = \frac{Area}{Rp} = \frac{60}{8.03} = 7.47\ Lt$$

Pero la cantidad de litros calculados anteriormente es solo para una capa de pintura, pero se deben aplicar tres capas por lo tanto se deben multiplicar por tres el valor hallado antes.

$$Nº_T = (nº\ de\ capas)\left(Nº_{1\ capa}\right) = (3)(7.47) = 22.41\ Lt.$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

CANTIDAD DE PINTURA A UTILIZAR

Epoxy Poliamida con Hierro Micáceo	
Esp.total seca[um]	180
Area [m2]	85
SV[%]	0.63
Nº de capas	3.00
Espesor de capa seca [um]	60.00
Espesor de capa humeda [um]	95.24
Fac. de aplicación **(airless)**	0.85
Fac. de superficie **(nueva)**	0.90
Rendimiento práctico	8.03
Lts. por capa	10.58
Lts. Total de pintura	**32**

APÉNDICE J
CÁLCULO DE LA PRESION PRODUCIDA POR EL VIENTO SEGÚN LA NORMA ASCE 7-05

CÁLCULO DE LA PRESIÓN PRODUCIDA POR EL VIENTO SEGÚN LA NORMA ASCE 7-05

Para el cálculo de la fuerza producida por el viento se va a utilizar el código ASCE 7-05, mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{F}{A} = q_z G C_f \left[\frac{N}{m^2}\right]$$

Ecuación 6-28 ASCE 7-05

Dónde:

q_z= Velocidad de presión evaluado a la altura z
G= Coeficiente de ráfaga
C_f= Coeficiente de fuerza

Pero primero se debe obtener el valor de la presión producida por la velocidad del viento, con ayuda de la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \left[\frac{N}{m^2}\right]$$

Ecuación 6-15 ASCE 7-05

Dónde:

q_z= Velocidad de presión evaluado a la altura z
K_z= Coeficiente de presión de la velocidad
K_{zt}= Factor topográfico
K_d= Factor de dirección del viento
V= Velocidad básica del viento

Factor de dirección del viento [K_d]

Para determinar este coeficiente se debe utilizar la siguiente tabla, que se muestra a continuación.

Structure Type	Directionality Factor K_d*
Buildings	
Main Wind Force Resisting System	0.85
Components and Cladding	0.85
Arched Roofs	0.85
Chimneys, Tanks, and Similar Structures	
Square	0.90
Hexagonal	0.95
Round	0.95
Solid Signs	0.85
Open Signs and Lattice Framework	0.85
Trussed Towers	
Triangular, square, rectangular	0.85
All other cross sections	0.95

EXTRACTO DE LA NORMA ASCE 7-05; FACTOR DE DIRECCIÓN (tabla 6-4 de la norma ASCE, pag.80)

De donde se selecciona Kd=0.85, porque se va analizar una chimenea.

Coeficiente de presión de la velocidad [Kz]

Para determinar este coeficiente, se utiliza la siguiente ecuación:

$\mathrm{K_z} = 2.01\left(\frac{z}{z_g}\right)^{2/\propto}$; para $4m \leq z \leq z_g$

$\mathrm{K_z} = 2.01\left(\frac{15}{z_g}\right)^{2/\propto}$; para $z < 4m$

Dónde:

Zg=365.76

α=7

Factor topográfico [K_{zt}]

Este factor se debe a que sitio se encuentra localizada la estructura, es decir si existen colinas, acantilados o hay variaciones bruscas de la geografía de la zona. Para facilitar el cálculo se lo considero como 1 (K_{zt} =1)

Velocidad básica del viento [V]

Esta velocidad depende del sector donde se encuentra la estructura, pero como la norma ASCE-7 es una americana, se escogió la velocidad mínima que establece la misma, la cual es de 136.8 Km/h (85 mph).

Coeficiente de ráfaga [G]

Este factor de ráfaga se la puede calcular de varias formas, pero la más sencilla es asumir un valor de 0.85 (G=0.85)

Coeficiente de fuerza [Cf]

El coeficiente de fuerza depende del tipo de estructura en este caso una chimenea circular y la relación $\frac{\mathrm{h}}{D}$ (altura vs diámetro).

$$\frac{\mathrm{h}}{D} = \frac{50\ m}{1.4\ m} = 35.71$$

Éste coeficiente se lo obtiene de la figura que se muestra a continuación.

Other Structures – Method 2		All Heights
Figure 6-21	Force Coefficients, C_f	Chimneys, Tanks, Rooftop Equipment, & Similar Structures

Cross-Section	Type of Surface	h/D		
		1	7	25
Square (wind normal to face)	All	1.3	1.4	2.0
Square (wind along diagonal)	All	1.0	1.1	1.5
Hexagonal or octagonal	All	1.0	1.2	1.4
Round ($D\sqrt{q_z} > 2.5$) ($D\sqrt{q_z} > 5.3$, D in m, q_z in N/m^2)	Moderately smooth	0.5	0.6	0.7
	Rough (D'/D = 0.02)	0.7	0.8	0.9
	Very rough (D'/D = 0.08)	0.8	1.0	0.2
Round ($D\sqrt{q_z} \le 2.5$) ($D\sqrt{q_z} \le 5.3$, D in m, q_z in N/m^2)	All	0.7	0.8	1.2

Notes:

1. The design wind force shall be calculated based on the area of the structure projected on a plane normal to the wind direction. The force shall be assumed to act parallel to the wind direction.
2. Linear interpolation is permitted for h/D values other than shown.
3. Notation:

   D: diameter of circular cross-section and least horizontal dimension of square, hexagonal or octagonal cross-sections at elevation under consideration, in feet (meters);

   D': depth of protruding elements such as ribs and spoilers, in feet (meters); and

   h: height of structure, in feet (meters); and

   q_z: velocity pressure evaluated at height z above ground, in pounds per square foot (N/m^2).

EXTRACTO DE LA NORMA ASCE 7-05; COEFICIENTE DE FUERZA
(Figura 6.21 de la norma ASCE, pag.74)

Finalmente los resultados de las operaciones a lo largo de toda la altura de la chimenea se muestran en la siguiente hoja de cálculo.

ESPOL-FIMCP	Proyecto:	Chimenea de 50 m	Norma:	ASCE 7-05
	En esta hoja:	Determinación de Carga de Viento	Revisión:	-
	Cliente:	ESPOL	Fecha:	15-sep-11

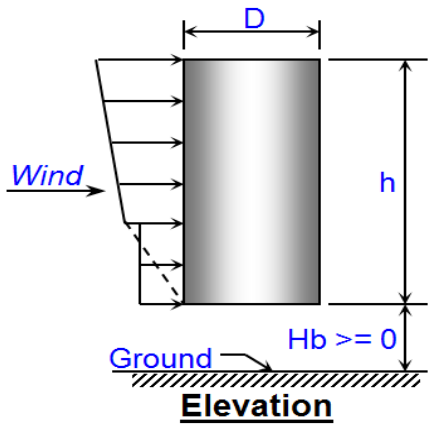
DETERMINACIÓN DE CARGAS DE VIENTO SOBRE CHIMENEAS

Norma: ASCE 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

Datos de entrada:

V=	40	m/s (Velocidad de Diseño)
Clase=	II	(Clasificacion de la estructura Tabla 1-1)
Exposicion=	B	(Categoria de exposicion Sec. 6.5.6)
Kzt=	1	(Factor topografico Sec. 6.5.7.2)
h=	50	m. (Altura de la chimenea)
D=	1,4	m. (Diametro de la chimenea)
Cf=	0,9	(Redonda, Hexagonal, o Cuadrada)
Kd=	0,95	(Factor de direccion, Tabla 6-4)

Parámetros para el cálculo del coeficiente de velocidad Kz



*Si z < 5 m usar: $K_z = 2.01\left(\frac{15}{z_g}\right)^{2/\alpha}$

*Si 5 ≤z ≤ zg usar: $K_z = 2.01\left(\frac{z}{z_g}\right)^{2/\alpha}$

α =	7	(Tabla 6-2)
zg =	365,76	(Tabla 6-2)
I =	1	
h/D =	35,71	
G =	0,85	(Factor de rafag, seccion 5.6.8)
Cf =	0,9	(Coeficiente de fuerza Figura 6-21)

FUERZA DE VIENTO SOBRE LA CHIMENEA

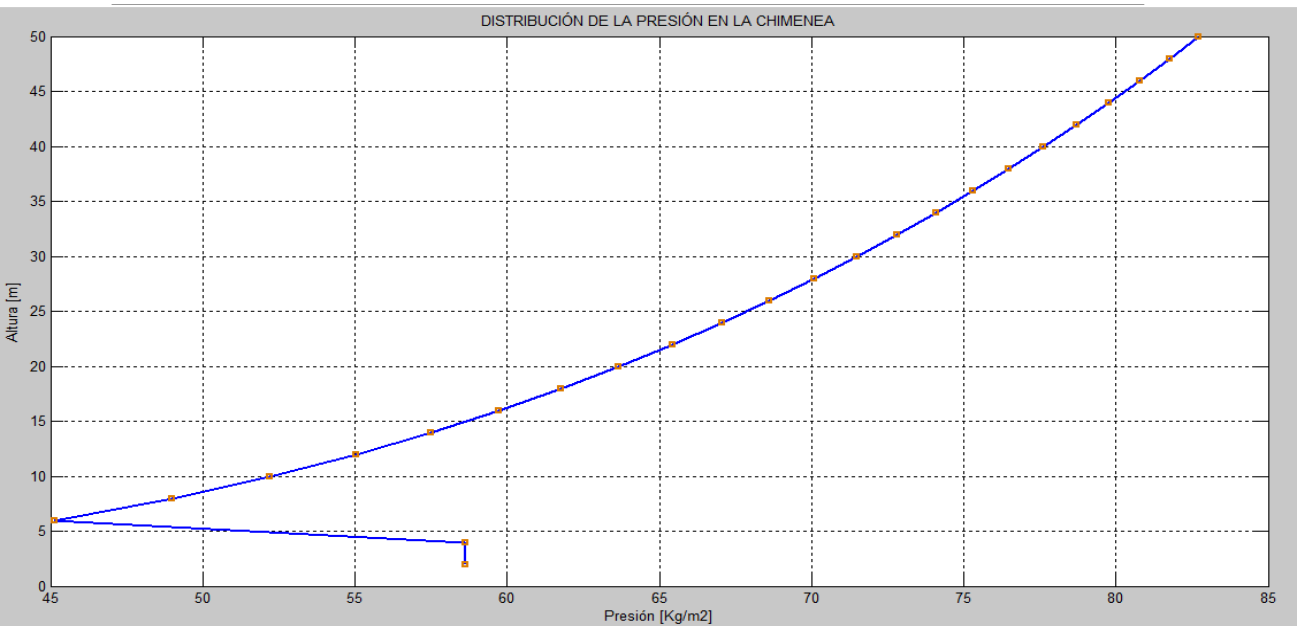
z [m]	Kz	qz [N/m2]	P. de diseño [N/m2]	P. diseño [Kg/m2]
2	0,81	751,94	575,24	58,64
4	0,81	751,94	575,24	58,64
6	0,62	578,75	442,74	45,13
8	0,67	628,32	480,67	49,00
10	0,72	669,69	512,31	52,22
12	0,76	705,50	539,71	55,02
14	0,79	737,26	564,01	57,49
16	0,82	765,94	585,94	59,73
18	0,85	792,15	606,00	61,77
20	0,88	816,36	624,51	63,66
22	0,90	838,90	641,75	65,42

ESPOL-FIMCP	Proyecto:	Chimenea de 50 m	Norma:	ASCE 7-05
	En esta hoja:	Determinación de Carga de Viento	Revisión:	-
	Cliente:	ESPOL	Fecha:	15-sep-11

DETERMINACIÓN DE CARGAS DE VIENTO SOBRE CHIMENEAS

Norma: ASCE 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

24	0,92	860,01	657,91	67,07
26	0,94	879,91	673,13	68,62
28	0,96	898,74	687,53	70,08
30	0,98	916,63	701,22	71,48
32	1,00	933,69	714,27	72,81
34	1,02	950,00	726,75	74,08
36	1,04	965,64	738,72	75,30
38	1,05	980,67	750,22	76,47
40	1,07	995,15	761,29	77,60
42	1,08	1009,12	771,98	78,69
44	1,10	1022,62	782,31	79,75
46	1,11	1035,70	792,31	80,77
48	1,13	1048,37	802,00	81,75
50	1,14	1060,67	811,41	82,71



FÓRMULAS UTILIZADAS:

*Presion del viento (Sec. 6.5.10, Eq. 6-15):

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \left[\frac{N}{m^2}\right]$$

*Presion neta de diseño (Sec. 6.5.13):

$$\frac{F}{A} = q_z G C_f \left[\frac{N}{m^2}\right]$$

APÉNDICE K
ESPECTRO DE ACELERACIÓN SEGÚN EL CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN

ESPOL-FIMCP	Proyecto:	Chimenea de 50 m	Norma:	CEC
	En esta hoja:	Determinación del Espectro de Aceleración	Revisión:	-
	Cliente:	ESPOL	Fecha:	15-Sep-11

DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO SÍSMICO ELÁSTICO

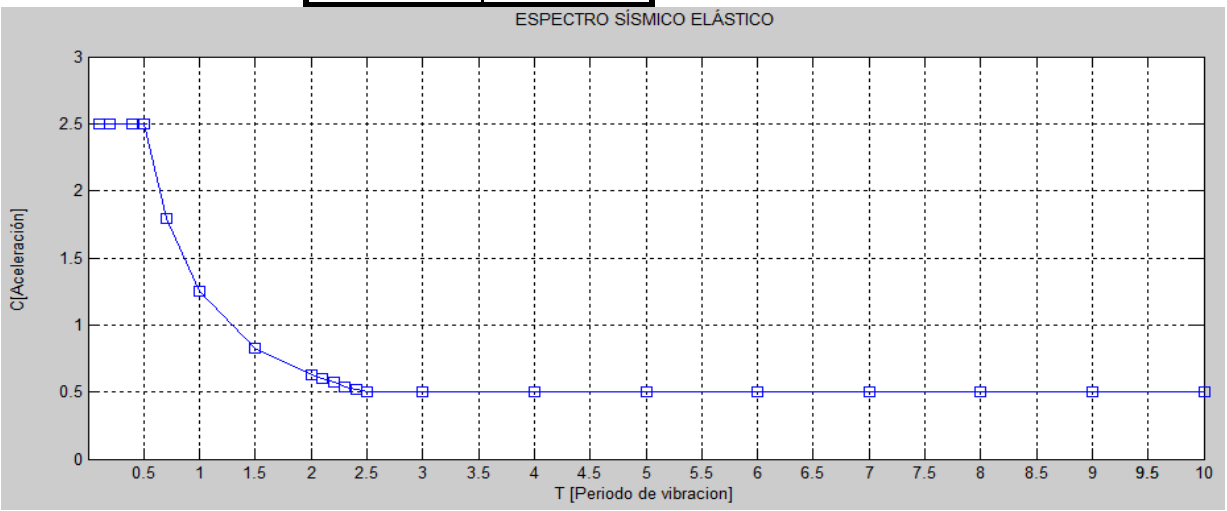
Norma: CEC Código Ecuatoriano de la Construcción

Datos de entrada:

Cm	2.5	m/s (Velocidad de Diseño)
S	1	(Clasificacion de la estructura Tabla 1-1)

Zona Sísmica	I	II	III	IV
Valor factor Z	0.15	0.25	0.3	0.4

T [Frecuencia]	C [Aceleración]
0.1	2.50
0.2	2.50
0.4	2.50
0.5	2.50
0.7	1.79
1	1.25
1.5	0.83
2	0.63
2.1	0.60
2.2	0.57
2.3	0.54
2.4	0.52
2.5	0.50
3	0.50
4	0.50
5	0.50
6	0.50
7	0.50
8	0.50
9	0.50
10	0.50



BIBLIOGRAFÍA

1. AHMED, S.H. and ZACZEK, B.J., A Kinetic Study of factors influencing S03 formation in a Pre-mixed laminar flame. J.Inst. Fuel, 50-107-110 June 1977.

2. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design, Second Edition, USA, 1994.

3. AMERICAN WELDING SOCIETY, STRUCTURAL WELDING CODE STEEL AWS D1.1/D1.1M:2006

4. API RECOMENDED 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 CONSTRUCCION, Peligro Sísmico, Espectros de Diseño y Requisitos Mínimos de Calculo, 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.