



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Estructuras

**LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA INDUSTRIAL DE
ACERO, CASO DE ESTUDIO: CHIMENEA DE 90 METROS DE ALTURA AUTOSOPORTADA**

Ing. Carlos Eduardo Galicia Castillo

Asesorado por el Msc. Ing. Julio César Escobar Zeceña

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA INDUSTRIAL DE
ACERO, CASO DE ESTUDIO: CHIMENEA DE 90 METROS DE ALTURA AUTOSOPORTADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. CARLOS EDUARDO GALICIA CASTILLO

ASESORADO POR MSC. ING. JULIO CÉSAR ESCOBAR ZECEÑA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rosal Paz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA INDUSTRIAL DE ACERO, CASO DE ESTUDIO: CHIMENEA DE 90 METROS DE ALTURA AUTOSOPORTADA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 11 de septiembre de 2021.

Ing. Carlos Eduardo Galicia Castillo

Facultad de Ingeniería

Decanato
24189101-
24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.003.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA INDUSTRIAL DE ACERO, CASO DE ESTUDIO: CHIMENEA DE 90 METROS DE ALTURA AUTOSOPORTADA**, presentado por **Carlos Eduardo Galicia Castillo**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, enero de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, enero de 2022

LNG.EEP.OI.003.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA INDUSTRIAL DE ACERO, CASO DE ESTUDIO: CHIMENEA DE 90 METROS DE ALTURA AUTOSOPORTADA”

presentado por **Carlos Eduardo Galicia Castillo** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 03 de agosto de 2018.

M.A. Ing. Edgar Dario Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Presente.

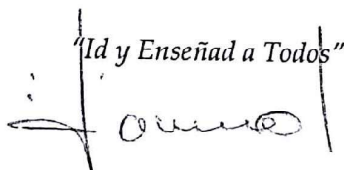
M.A. Ing. Álvarez Coti:


Por este medio informo que he revisado y aprobado el Protocolo de Tesis titulado: **"LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA INDUSTRIAL DE ACERO, CASO DE ESTUDIO: CHIMENEA DE 90 METROS DE ALTURA AUTOSOPORTADA"**, del (la) estudiante **Carlos Eduardo Galicia Castillo** quien se identifica con número de carne: **201590718** del Programa de Maestría en **Estructuras** de la sede Quetzaltenango.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Área Infraestructura
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/LZLA.

Guatemala, febrero de 2020

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad universitaria, zona 12
Presente

Atentamente me dirijo a ustedes para notificar que yo, **Julio Cesar Escobar Zeceña**, ingeniero estructural graduado de la escuela de estudios de postgrado, de la Facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con número de **colegiado activo 5382**; he asesorado y revisado el trabajo especial de graduación titulado: **"LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CHIMENEA INDUSTRIAL DE ACERO, CASO DE ESTUDIO: CHIMENEA DE 90 METROS DE ALTURA AUTOSOPORTADA"** realizado por el estudiante **CARLOS EDUARDO GALICIA CASTILLO**, quien se identifica con el carné número **201590718**.

Me permito informarle que los aspectos técnicos planteados por el suscrito durante el desarrollo del trabajo han cumplido de forma satisfactoria con los requisitos necesarios para un trabajo de graduación y constituyen un valioso aporte para nuestra profesión; razón por la cual se da por **APROBADO**.

En base a lo anterior el Ing. Carlos Eduardo Galicia Castillo puede continuar con los trámites necesarios para proceder con la defensa de su trabajo previo a optar el grado de Maestro en Estructuras.

Atentamente,


Julio César Escobar Zeceña
Ingeniero Civil Col. No. 5382

Julio Cesar Escobar Zeceña
Ingeniero civil, colegiado No. 5382
Maestro en estructuras

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Porque todo se lo debo a Él.
Mi esposa e hijo	Ustedes que me motivan día a día, les dedico todos mis logros.
Mis padres	Siempre han creído en mí y me han apoyado, desde una palabra, hasta darme todo, gracias a ustedes hoy soy quien soy.
Patricia y Andrés Galicia Castillo	El esfuerzo y sacrificio tendrá siempre su recompensa.
Escuela de Postgrado	Por los conocimientos adquiridos.
Universidad San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> .
Todos	Los que me han permitido participar en proyectos aceptando mis propuestas y aportaciones. Gracias a ustedes he obtenido la experiencia para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por todas las bendiciones que día a día recibo. Todo se lo debo a Él.
- Mi esposa** Ana Luisa López Solís, mi mejor amiga y mi todo. Por tu amor y apoyo incondicional, los cuales me permiten alcanzar mis sueños. Por estar siempre a mi lado. Te amo.
- Mi hijo** Carlos Joaquín Galicia López, eres mi motor y motivación para luchar. Espero un día darte tanta felicidad como tú me has dado a mí.
- Mi padre** Carlos Roberto Galicia Serrano. Eres mi ejemplo por seguir en la vida. Gracias por dejarme tus huellas para seguirlas.
- Mi madre** Claudia Patricia Castillo Leiva, por enseñarme la nobleza y el amor. Espero un día tener un corazón tan grande como el tuyo.
- Mis hermanos** Patricia y Andrés Galicia Castillo. Porque en todo momento han creído en mí y me han apoyado. Siempre estaremos unidos.

Familia y amigos

Por alentarme cada vez que el cansancio llegó a ser agotador.

2.	CRITERIOS DE DISEÑO	17
2.1.	Cargas laterales	18
2.1.1.	Fuerzas laterales debido a viento.....	18
2.1.1.1.	Propiedades características del viento cruzado	21
2.1.1.2.	Oscilaciones estructurales de desprendimiento de vórtices.....	21
2.1.1.3.	Mejoramiento de aerodinámica	22
2.1.1.4.	Fuerzas sísmicas	29
2.1.2.	Cargas verticales.....	31
2.1.2.1.	Cargas muertas.....	31
2.1.2.2.	Cargas vivas.....	31
2.1.3.	Cargas por servicio	32
2.2.	Uniones	32
3.	CASO DE ESTUDIO	35
3.1.	Normativas y lineamientos de diseño.....	35
3.1.1.	IS 6533 (Parte 1): 1989	36
3.1.2.	IS 6533 (Parte 2): 1989	36
3.1.3.	ASTM STS	36
3.1.4.	AGIES	37
3.2.	Materiales, geometría y aspectos de diseño	37
3.2.1.	Material para utilizar para la placa será acero ASTM A36.....	38
3.2.2.	Diámetro.....	38
3.2.3.	Sección.....	41
3.3.	Información de diseño	41
3.3.1.	Determinación de altura	42

3.3.1.1.	Determinación de altura mínima según requerimiento ambiental.....	43
3.3.1.2.	Determinación de altura según requerimiento por normativa.....	43
3.3.2.	El espesor mínimo de la pared de la chimenea	46
3.3.3.	Determinación de esfuerzos permisibles	48
3.3.3.1.	Esfuerzos para chimeneas circulares permisibles.....	48
3.4.	Combinaciones de carga	50
3.5.	Cálculo de carga sísmica.....	51
3.6.	Espectro de respuesta.....	55
3.7.	Esfuerzo debido a peso propio	57
3.7.1.	Determinación de carga de viento según normativa hindú.....	58
3.8.	Chequeo de espesor	61
3.9.	Consideraciones previo a análisis	62
3.10.	Propuesta de dimensiones y espesores	62
4.	RESULTADOS Y COMPARACIÓN DE MODELOS.....	65
4.1.	Análisis de proyecto	65
4.1.1.	Cargas laterales debidas a viento.....	65
4.1.2.	Cargas debidas a peso propio	65
4.1.3.	Cargas debidas a accesorios en la superficie de la chimenea	66
4.2.	Análisis de modelo: en 75 a 90 metros de alturas	66
4.3.	Análisis de modelo: en 60 a 75 metros de altura.....	70
4.4.	Análisis de modelo: en 45 a 60 metros de altura	73
4.5.	Análisis de modelo: en 30 a 45 metros de altura	77
4.6.	Análisis de modelo: en 15 a 30 metros de altura	81

4.7.	Análisis de modelo: en 0 a 15 metros de altura	87
4.8.	Resumen de cálculos	92
4.9.	Análisis de modelo: en 75 a 90 metros de alturas.....	93
4.10.	Análisis de modelo: en 60 a 75 metros de altura	97
4.11.	Análisis de modelo: en 45 a 60 metros de altura	100
4.12.	Análisis de modelo: en 30 a 45 metros de altura	105
4.13.	Análisis de modelo: en 15 a 30 metros de altura	108
4.14.	Análisis de modelo: en 0 a 15 metros de altura	114
4.15.	Resumen de esfuerzos con espesor a utilizar.....	119
4.16.	Diseño de cimentación	120
4.16.1.	Cálculo de carga de viento	120
4.16.1.1.	Tipo de exposición	121
4.16.2.	Criterios de geometría de cimiento.....	129
4.16.2.1.	Chequeo de estabilidad al volteo	132
4.17.	Análisis de modelo con software	141
4.18.	Definición de modelo.....	142
4.19.	Resultados de modelo.....	152
4.20.	Resultados de análisis estructural.....	155
4.20.1.	Período natural de la estructura	155
4.20.2.	Esfuerzos Von Mises.....	156
4.20.3.	Esfuerzos debidos a temperatura.....	158
4.20.4.	Cálculo de derivas.....	159
CONCLUSIONES.....		161
RECOMENDACIONES		163
REFERENCIAS		165

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Calle de Vórtices de Von Karman	24
2.	Fases de calles de vórtices de Von Karman	25
3.	Dispositivos comunes que suprimen vibración inducida por los vórtices de Von Karma	27
4.	Límites de inestabilidad en una chimenea sin aletas y con aletas helicoidales	28
5.	Detalle de conexión para anillos durante montaje de chimeneas	33
6.	Descripción de altura efectiva para una chimenea autosoportada	41
7.	Espectro de respuesta para La Democracia, Escuintla, Guatemala	56
8.	Elevación de la chimenea, con diámetros y espesores predimensionados presentando factores de viento	63
9.	Zonificación sísmica de Guatemala	124
10.	Geometría y descripción de las propiedades de un octágono.....	131
11.	Diagrama de presión de cimentación de chimenea, según sus cargas laterales y cargas verticales, en funcionamiento.....	133
12.	Diagrama de presión de cimentación de chimeneas y sus reacciones	136
13.	Creación de modelo en software SAP2000 V20.1 (CSI computers and structures	143
14.	Definición de material acero ASTM A 992 $F_y=50\text{KSI}$	144
15.	Espectro de aceleración sísmica según AGIES NSE 2-10 definido en software.....	145
16.	Asignación de carga lateral debida a viento sobre superficie de chimenea.....	145

17.	Asignación de carga lateral debida a viento sobre superficie de chimenea	147
18.	Asignación de carga por temperatura debida a los gases a expulsar a través de chimenea	147
19.	Combinación de carga CR1	148
20.	Combinación de carga CR2.....	148
21.	Combinación de carga CR4 para sismo en dirección positiva	149
22.	Combinación de carga CR4 para sismo en dirección negativa.....	149
23.	Combinación de carga CR6.....	150
24.	Combinación de carga CR7 con viento a favor.....	150
25.	Combinación de carga CR7 con viento en contra.....	151
26.	Combinación de carga CR12.....	151
27.	Combinación de cargas para estimar valores máximos de esfuerzos ..	152
28.	Esfuerzos en chimenea según combinaciones de carga en la base	153
29.	Esfuerzos en chimenea según Von Mises	157
30.	Asignación de cargas por temperatura	158
31.	Resultados de esfuerzo en lámina donde el máximo no supera los 25kip	158
32.	Definición de empuje o aceleración sísmica	159
33.	Desplazamiento máximo generado debido a sismo donde el resultado de desplazamiento es 0.05cms.....	160

TABLAS

I.	Altura recomendada según el diámetro de la chimenea autosoportada	39
II.	Esfuerzos máximos permisibles para chimeneas circulares	49
III.	Datos y parámetros para definir espectro de respuesta para la Democracia, Escuintla, Guatemala.....	52

IV.	Ajustes especiales según la clase de sitio	53
V.	Ajustes por las intensidades sísmicas	53
VI.	Ajustes especiales según la clase de sitio y las intensidades sísmicas	55
VII.	Resultados de períodos y aceleraciones que construyen el espectro de respuesta para La Democracia, Escuintla, Guatemala	56
VIII.	Factores k2 dependiendo de categoría y tipo terreno	61
IX.	Resumen de secciones analizadas con espesor, esfuerzo a tensión actuante y ratio demanda/capacidad.....	92
X.	Resumen de secciones por utilizar, con espesores reales, esfuerzo a tensión actuante y ratio demanda/capacidad	119
XI.	Condiciones de sitio y protección para Guatemala, sección 5	121
XII.	Condiciones de sitio y protección para Guatemala, sección 5	123
XIII.	Resultados de presión de viento a diferentes alturas según ecuación.	125
XIV.	Resultados de momento debido a presión de viento a diferentes alturas analizadas según la altura de esta	127
XV.	Resultados de momento tomando como origen el inicio de la cimentación según la presión de viento a diferentes alturas de la chimenea	129
XVI.	Resultados de momento tomando como origen el inicio de la cimentación según la presión de viento a diferentes alturas de la chimenea	146
XVII.	Resultados obtenidos según cargas y combinaciones asignadas al elemento placa del cual está compuesto la chimenea	154
XVIII.	Resultados obtenidos para la participación modal donde se determina un período natural de 1.44 segundos	156

GLOSARIO

ACI	<i>American Concrete Institute.</i>
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
CICIND	<i>International Comitee for Industrial Construction.</i>
IS	<i>Indian Standard.</i>

RESUMEN

El estudio plantea analizar el comportamiento de una chimenea industrial de acero de 90 metros de altura autosoportada, presentando todos los criterios estructurales a fin de tener una guía que demuestre el comportamiento de una chimenea de acero autosoportada bajo su operación normal liberando gases generados por trabajos con calderas en una industria azucarera dentro de la república de Guatemala, específicamente en el sur del país, en el municipio de la Democracia, Escuintla. El estudio analiza los diferentes escenarios en los que podría estar involucrado este tipo de proyecto determinando, así como los aspectos más críticos, para no interrumpir el funcionamiento o proceso de la estructura en mención.

Para este estudio se analizan las diferentes normativas que pueden ser aplicadas a este tipo de obra, utilizando parámetros de normativas de países que cuentan con más investigación en estos temas como la India y Estados Unidos, junto con la existente en Guatemala, donde se evalúan y comparan los parámetros utilizando métodos de análisis y diseño, para poder cumplir los requerimientos de proceso de generación de gases a una altura ambientalmente adecuada, pues la finalidad de una chimenea es la protección del ambiente que habitan los seres vivos, despidiendo, los gases productos de procesos industriales, a capas de la atmosfera donde por diferencia de densidad en comparación con el oxígeno y el dióxido de carbono, deberían mantenerse en mayores alturas para resultar menos dañinas para los humanos, flora y fauna que habitan la superficie terrestre.

El diseño de la chimenea de acero autoportada contempla una estructura con altura de 90 metros sobre el nivel de suelo, diseñada con acero especial, teniendo en consideración los factores de seguridad para la integridad de la misma lámina, pues el ambiente que rodearía el proyecto es considerablemente corrosivo y dañino, siendo este un factor a considerar para no exponer el material y debilitar su sección, asimismo, se propone su diseño de cimiento para que la misma sea autosostenible, pues entre la clasificación de chimeneas de altura considerable, como lo es este caso de estudio, podrían ser chimeneas autoportadas o apoyadas a una estructura existente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Descripción del problema

La construcción de chimeneas industriales de acero de hasta 90 metros de altura, no cuentan con lineamientos específicos para el diseño o construcción dentro del área de Guatemala, no se cuenta con una adaptación correcta de normas extranjeras lo que permite la construcción de estas obras sin parámetros seguros.

- Delimitaciones

Dado que las chimeneas de acero de 90 metros son frecuentemente utilizadas por las fábricas o industrias de diferentes tipos, el estudio se concentra en las industrias azucareras en la zona sur del país, la delimitación geográfica enmarcó el caso de estudio al Ingenio Magdalena S.A., ubicado en el municipio de la Democracia, departamento de Escuintla, Guatemala.

No existen estudios relacionados con el análisis estructural enfocado dentro del país de chimeneas industriales autosoportadas de acero de hasta 90 metros de altura, sino que en su lugar se ha utilizado normativas de otros países sin considerar parámetros de seguridad locales.

- Pregunta central

¿De no contar con lineamientos hechos para Guatemala, se continuarán utilizando normativas de otros países, que tienen diferentes características de lugar, ambiente, clima, diferentes tipos de materiales, entre otros?

Preguntas auxiliares

- ¿Existen modelos de diseño para chimeneas industriales de acero en Guatemala?
- ¿El análisis estructural realizado a las chimeneas de acero en Guatemala, toma en consideración aspectos de zona, climáticos, sísmicos y del ambiente?

OBJETIVOS

General

Proporcionar lineamientos técnicos para el diseño de una chimenea industrial de acero de hasta 90 metros de altura, tomando en consideración criterios ingenieriles y estructurales internacionales, adaptados para la región sur de Guatemala.

Específicos

- Analizar y considerar criterios y normativas, tanto del territorio nacional, como internacional, adaptando su base científica para obtener diferentes parámetros de aplicación de análisis, y así obtener demandas estructurales.
- Obtener esfuerzos críticos, analizar dinámicamente la estructura a fin de proporcionar valores que permitirán el diseño y funcionamiento de la chimenea cumpliendo con los factores de seguridad.

INTRODUCCIÓN

Las chimeneas son utilizadas para liberar y dispersar gases y humo producto de procesos químicos que quedan como residuo, el cual debe diseminarse a alturas considerables para evitar la contaminación de la atmósfera. Estas chimeneas son construidas con diferentes materiales como el acero, concreto o mampostería.

Las chimeneas industriales de acero son idealmente adecuadas para procesos de trabajo donde hay un corto período de calor y donde la capacidad térmica relativamente baja es requerida. Cuando los gases en una chimenea de acero son expulsados a altas temperaturas tienden a expandirse, los gases calientes ocupan un volumen mucho más grande que cuando están en su estado normal a una temperatura no tan elevada, el peso de los gases por unidad de volumen consecuentemente se vuelve menor.

Como resultado de lo anterior, la unidad de presión en el fondo de la chimenea debido al peso de los gases calientes también se vuelve menor, debido al peso del aire frío afuera de la chimenea. La diferencia entre las dos presiones resultantes es el flujo de los gases quemados en la chimenea.

Para poder llevar a cabo el diseño de las chimeneas industriales, se debe tomar en cuenta la normativa que regula la contaminación y el impacto en el ambiente junto con los requerimientos estructurales, la cual estará afectada por diferentes factores, pues de lo contrario puede dejar en riesgo a la misma estructura.

Por lo que se propone un método de diseño con un análisis matemático, guiado con la normativa india para parámetros de geometría y consideraciones iniciales y la aplicación de cargas, debido a características locales se consideran las directrices indicadas en AGIES, para determinar por método de resistencia de los materiales y esfuerzos calculados, si la estructura cumple con los requerimientos, para posteriormente comparar los resultados con un modelo realizado mediante elementos finitos.

El caso para analizar es una chimenea de acero, con una altura de 90 metros con un cimiento de concreto armado auto soportado para una industria del sector azucarero, la cual se realizará en la región sur de Guatemala.

Por lo cual se ha dividido la investigación en 4 capítulos. En el primero se presentarán los aspectos generales del concepto de una chimenea, historia, el funcionamiento de esta, por qué evacuar los gases a alturas y por qué una chimenea es la estructura ideal para realizarlo.

En el capítulo 2 se estudiarán los criterios y características que deben tomarse en cuenta antes de iniciar con un diseño como: zonificación, impacto ambiental, efectos de funcionamiento y de cargas a chimeneas de acero.

- Cargas laterales: efectos por viento, efectos debidos a sismos
- Cargas gravitacionales: cargas vivas y muertas
- Efectos debidos a la temperatura

El diseño de la chimenea de acero auto soportada (caso de estudio) será realizado en el capítulo 3 donde se analizan los aspectos mecánicos y estructurales, la metodología de diseño, cargas a tomar en cuenta,

combinaciones de carga, valores y criterios para diseño, normativa aplicable, dimensiones, esfuerzos permisibles y limitaciones.

En el cuarto y último capítulo se analizarán los efectos y resultados de la geometría propuesta, el comportamiento dinámico y estático, conclusiones y la comparación de los resultados obtenidos por métodos matemáticos contra una réplica del modelo realizado por análisis de elementos finitos con software especializado.

1. ASPECTOS GENERALES DE LAS CHIMENEAS INDUSTRIALES

Las chimeneas industriales, son estructuras de altura considerable con forma cónica o de sección circular, las cuales originalmente se utilizaban para expulsar fuera del lugar habitacional los gases producidos de actividades de pequeños grupos de personas como la emisión de humo procedente de cocinar, y que ha cambiado con el tiempo hasta formar una parte importante dentro de la relación de las industrias junto con el medio ambiente, pues en gran parte de esto depende considerablemente la contaminación que podría o no generar algún procesos industrial.

Las chimeneas industriales son elementos de suma importancia para varios de estos procesos industriales debido a que los gases generados deben ser expulsados de alguna forma que resulte segura para los operarios y vecinos a la industria, siendo características por su forma tan esbelta, donde su principal función es la emisión de gases a alturas considerablemente elevadas para evitar la contaminación de ciertos estratos de la atmósfera. Estas estructuras de gran altura tienen generalmente una sección circular y existen varios materiales de construcción como lo son: concreto, mampostería o acero. Las chimeneas de acero son ideales para procesos de trabajo donde se cuenta con un corto período de tiempo para aumentar la temperatura y se requiere una capacidad térmica baja.

Las chimeneas industriales de acero son relativamente económicas para alturas de más de 45 metros, las chimeneas de mampostería para alturas

menores por sus facilidades constructivas y las chimeneas compuestas de concreto reforzado para alturas mayores a 90 aunque cabe mencionar que estas requieren diámetros mucho mayores para tener la rigidez y estabilidad necesaria, mientras que las chimeneas de acero pueden mantener secciones menores por la versatilidad del material.

Existen diferentes normativas para el diseño de chimeneas industriales, aunque ninguna específica para la región y mucho menos para Guatemala. Aunque bien pueden ser aplicadas las normas de otros países se cuentan con diferentes como la CICIND que son las normas del comité internacional de chimeneas industriales (*Standards of International Committee on Industrial Chimneys* CICIND) en su versión de 1999 o bien la normativa IS provenientes de la India, en la cual establecen diferentes valores para diseño geométrico y estructural de las chimeneas.

La geometría de una chimenea de acero autosoportada juega un papel muy importante debido a que de esto dependerá su comportamiento estructural ante cargas estáticas y dinámicas y bien para cargas verticales u horizontales. Es por esto por lo que los parámetros de geometría son los responsables de la rigidez de esta, de cualquier manera, los parámetros básicos de la chimenea como diámetro en la base, altura y diámetro en extremo superior, entre otros, están asociados con las correspondientes condiciones ambientales.

El diseño y características de la chimenea como la altura a la cual deben ser expulsados los gases volátiles está en función de diferentes características como:

- Ubicación de la industria o proyecto, pues de esto dependería las velocidades de viento y sísmicas que podrían inducir cargas laterales el volumen de gases a expulsar.
- Cambios de temperatura que podría sufrir y en que períodos de tiempo se alcanzan estos.
- Las diferentes velocidades de los gases.
- Tipo de gas a evacuar.

Son algunos de los muchos factores que serán decisivos en el momento del diseño de una chimenea industrial.

Entre las cargas que tienen mayor incidencia sobre una chimenea y su comportamiento, son las laterales, como pueden ser las cargas de viento o sísmicas, de acuerdo a normativa guatemalteca pueden utilizarse los parámetros de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES) donde se brindan diferentes factores que dependen del tipo de estructura y ubicación entre otros, los cuales serán factores que tendrán incidencia en el cálculo de estas cargas laterales más adelante para poder analizar el modelo en sus situaciones más críticas y asegurar la integridad del mismo ante acontecimientos extraordinarios y no comprometer el funcionamiento de la misma o de la fábrica o industria a la que esta pertenezca.

1.1. Funcionamiento

El funcionamiento de una chimenea es producido por 2 formas:

- Por la corriente de aire generada debido a una presión desequilibrada la cual es producida por una diferencia de temperaturas, como bien se sabe

los procesos industriales requieren muchas veces líquidos o componentes que dejan residuos que al calentarse pasan de estar líquido o sólido a un estado gaseoso, para llegar a este punto las partículas que componen dichos elementos deben separarse, estos enlaces entre moléculas sólo pueden ser separados mediante la absorción de energía, pero dicha energía se manifiesta muchas veces en forma de calor, con lo cual estos gases estarán a temperaturas elevadas generalmente.

Esto hace que los mismos sean expulsados hacia el exterior debido a que entre el humo o gases que disponen de una temperatura mayor en comparación a la del oxígeno y gases que se encuentran en el ambiente que rodea a estos procesos industriales, estará a una temperatura menor, la diferencia de densidades entre ambos gases genera que el gas a temperatura mayor ascienda a manera de estar sobre el resto de los gases que se encuentran en el medio ambiente. Generalmente se le conoce como tiro natural a la diferencia de densidades, cuando los gases que contienen más calor son expulsados por la chimenea y esta debe ser ocupada por gases que lo rodean (oxígeno o gases en el ambiente) que tienen una temperatura menor.

- La otra forma en la cual una chimenea industrial podría funcionar es haciendo uso de un chorro de vapor en la chimenea, con la cual se añade presión, de todos los procesos industriales se conducen los vapores por tuberías, provenientes de motores, calderas o ventiladores, son conducidos por tubería hasta poder ser expulsados mediante una chimenea industrial, generalmente es un método utilizado donde la producción de gases es considerablemente grande, con lo cual este volumen no puede ser expulsado de la manera típica esperando a que la diferencia de densidades

pueda actuar sobre estos gases, deben ser expulsados a velocidades mayores para no formar una interrupción en el proceso industrial o bien ser un cuello de botella.

1.2. Tipos de chimeneas industriales

Las chimeneas industriales pueden ser construidas de mampostería, concreto o acero, generalmente el tipo de material por utilizar dependerá de las condiciones de servicio de la chimenea, la altura, geometría, topografía, ubicación, fuerzas laterales y costos.

Las chimeneas industriales pueden clasificarse de diferentes maneras, empezando por la forma de estar apoyadas, pueden ser de dos maneras:

- Chimeneas autosoportadas: cuando las fuerzas laterales provenientes de viento o de sismo son transmitidas a los cimientos por la forma de comportarse en voladizo, la chimenea se conoce como autosoportada pues no depende de algún tipo de apoyo o estructura adicional con la cual compartir esfuerzos y tener apoyo para contar con un mejor equilibrio. Generalmente están construidas para diámetros arriba de los 10 metros y de 50 metros hasta 100 metros de altura.
- Chimeneas con apoyos: en chimeneas de acero de gran altura esta se encuentra apoyada con elementos estructurales a una estructura vecina, mediante vigas o columnas, también pudiendo ser fijada con cuerdas de alambre de acero ancladas al suelo para transmitir fuerzas laterales. En chimeneas de acero, todas las cargas aplicables externamente (viento y fuerza sísmica) no son totalmente conducidas por el recubrimiento que esta

tenga. De esta manera se asegura la estabilidad de las chimeneas, generalmente con grupos de apoyos en 3, 4 o a veces hasta seis cables conectados a la estructura, dependiendo de la altura. La ubicación de estos dependerá del análisis estructural y geotecnia del suelo que lo rodea, aunque en su mayoría se ubica en un tercio o un cuarto de la altura.

La elección entre una chimenea autosoportada o una chimenea con apoyos depende de diferentes criterios entre los cuales pueden ser: el número de unidades a ocupar un espacio, el tipo de equipamiento, el tipo de combustible a evacuar y el tipo de operación con la que se cuenta, entre otros.

Otra clasificación que pueden tener las chimeneas es en base al material del que están compuesto pudiendo ser:

1.2.1. Chimeneas de acero

Utilizadas idealmente para procesos de trabajo con períodos de calentamiento cortos, donde se requiere una baja capacidad térmica en un ambiente alto en ácidos y corrosión, lo cual compromete la vida de una chimenea. Son viables en precio a partir de alturas de 65 metros hasta 100 metros aproximadamente, o si el flujo o condiciones de ambiente demandan este material.

1.2.2. Chimeneas de concreto reforzado

Aunque son más caras que las de acero, debido a que utilizan secciones más grandes para auto soportarse, son competitivas en alturas que superen los 60 metros de altura, y según se tiene registro existen alturas superiores a los 350

metros. Entre las ventajas es que debido al peso y la rigidez de estos elementos pueden ser flexibles en cuanto a forma, pero tienden a ocupar áreas elevadas para obtener la rigidez necesaria.

1.2.3. Chimeneas de mampostería

Son factibles para industrias relacionadas con arcilla para su uso en cocción en hornos, con altas temperaturas y con gases no tan dañinos, pues debido al material no pueden alcanzar altas temperaturas. Estas requieren un mantenimiento menor que las de acero o incluso las de concreto volviéndolas más económicas para las industrias mencionadas.

Los factores que son importantes al momento de considerar que tipo de chimenea debe utilizarse debe ir en función a la altura, así como también el tipo de uso que se le dará, para lo cual deben considerarse los siguientes aspectos:

- Características del equipamiento para el cual está siendo la chimenea diseñado, incluyendo el número de unidades, tipo, entre otros y tomando en cuenta la futura expansión de unidades que serán propuestas, para su construcción.
- Tipo de combustible a utilizar y el gas resultante de los procesos industriales.
- En caso de calderas, analizarse el área de superficie, la eficiencia de salida, corriente de aire requerido y vapor producido.
- Modo de operación.
- Temperatura del gas a evacuar.

- Composición del gas a utilizar en el flujo, analizando su peso específico, cantidad de polvo o partículas volátiles, esto podría ser determinante en el tipo de acabado de ésta.
- Regulaciones locales de ambiente y contaminación.
- Modo de construcción o colocación de la chimenea, montaje y estructuras vecinas.

1.3. Gases volátiles

Las chimeneas industriales pueden ser utilizadas para los siguientes procesos:

- Energía geotérmica: energía térmica generada y almacenada en la tierra, generalmente a elevadas temperaturas, la energía geotérmica de la corteza terrestre es originada a partir de la formación original del planeta tierra y en porcentajes pequeños la descomposición radioactiva de los materiales que circulan por ella. El gradiente geotérmico, es la diferencia de temperatura entre el núcleo de la tierra y la superficie, esto impulsa una conducción continua de energía térmica en forma de calor desde el núcleo hasta la superficie.

El calor interno de la tierra es la energía térmica generada por la descomposición radioactiva y la pérdida continua de calor de la formación de la tierra, las temperaturas núcleo-manto pueden alcanzar más de 4,000 °C La alta temperatura y presión en el interior de la tierra hacen que algunas rocas se derritan haciendo que el manto sólido se comporte plásticamente, lo que genera que partes del manto se mantengan hacia arriba ya que es más liviana que la roca circundante. Las aguas termales

son corrientes de agua subterránea que es calentada por la geotérmica y generalmente se utiliza para bañarse y cuestiones relacionadas con la salud desde la antigüedad, pero ahora es utilizada para generar electricidad. La energía geotérmica es rentable, confiable, sostenible y respetuosa con el medio ambiente, aunque los pozos geotérmicos liberan gases de efecto invernadero atrapados en las profundidades de la tierra, generando así emisiones de gases en cantidades menores a las producidas en consumo de combustibles fósiles.

Los fluidos que son extraídos de la profundidad de la tierra transportan una mezcla de gases en su mayoría dióxido de carbono (CO₂), Sulfuro de hidrógeno (H₂S), Metano (CH₄) y amoníaco (NH₃). Estos contaminantes contribuyen al calentamiento global, lluvia ácida y olores que estos mismos liberan. Estos gases requieren que sean liberados a alturas que evitan la contaminación directa del ambiente que nos rodea. Siendo así gases que deben ser liberados a alturas seguras para los seres vivos que las rodean.

- Gas de turbinas: es un principio donde se aprovecha la energía potencial del gas comprimido y calentado, pues como resultado de que los gases al calentarse tienden a expandirse, pueden generar movimiento si se conduce por tuberías para mover hélices, produciendo un trabajo mecánico en ejes giratorios que disponga el sistema. Existen turbinas de vapor y turbinas de gas, ambas cuentan con una serie de etapas de gases con las cuales utilizan el impulso de gases, los productos mayormente utilizados son de combustión o combustibles orgánicos en estado líquido o gaseoso, aire limpio u otros gases limpios (gases inertes o sus mezclas) calentados por un artefacto especializado en intercambio de calor, se utilizan como fluido de trabajo de la turbina de gas, en este el aire limpio y otros gases no deben

mezclarse con productos de combustión, las mezclas de productos de combustión de combustible orgánico con agua o vapor también pueden ser utilizados como fluidos de trabajo de turbinas de gas.

- Calderas de vapor: el sistema de calderas de vapor son básicamente un dispositivo que convierte un producto químico en energía en una fuente de calor aprovechable como vapor o agua caliente, el tipo de combustible de mayor uso es el gas, aunque también los sistemas anteriores utilizaban en su mayoría carbón. Las calderas alimentadas con petróleo también existen y se mantienen en funcionamiento. La falta de fiabilidad del suministro de gas ha generado que existan también calderas de biomasa en funcionamiento, las cuales son utilizadas en su mayoría en lugares donde no se dispone de combustible de otro tipo. Dentro de una caldera, el combustible es consumido por los quemadores los cuales producen llamas y calor proveniente de la combustión, los gases creados transfieren el calor al agua la cual ha sido alimentada dentro de la caldera por una fuente externa.

El agua de alimentación ingresa a la caldera directamente o por un depósito contenido en tanques de almacenamiento, la temperatura a la que se calienta el agua dependerá de la salida, si es con vapor o agua caliente, pues en la mayoría de los casos el agua se encuentra a elevadas temperaturas aproximadamente a 90° - 100° centígrados manteniéndose en estado líquido todavía.

Existen dos tipos de calderas:

- Tipo cáscara: donde la combustión caliente pasa a través de tubería sumergida en agua y por consiguiente los calienta, transfiriendo el calor al vapor.

- Tipo tubo de agua: donde el agua está contenida en tubos y gases calientes producto de la combustión pasan a través de ellos calentando el agua.

Para que la combustión se lleve a cabo de manera eficiente, es de suma importancia la cantidad correcta de aire, con el combustible adecuado, se completa la combustión.

En el acuerdo de Clean Air Act 1993 HMSO (1993) se encuentran disposiciones relacionados con el control de arena, humo y polvo; dentro de este acuerdo hay diferentes tipos de prohibiciones e indicaciones como por ejemplo diferentes condiciones sujetas a emisiones de luz y humo negro de chimeneas que sirven calderas y plantas industriales, así como controlar la liberación de humo negro de las chimeneas que sirven a calderas y plantas industriales, también controla la liberación de humo de chimeneas locales industriales y comerciales.

- Liberación de gases industriales: la combustión se produce en una cámara de combustión; se requieren otras unidades de control para suministro de combustible y distribución de combustible, suministro de aire de combustión, transferencia de calor, gases de escape limpieza y descarga de gases de escape y residuos de combustión (cenizas, escorias). Los combustibles sólidos se queman en un lecho fijo o fluidizado o en una mezcla de aire / polvo. Los combustibles líquidos se alimentan a la cámara de combustión junto con el aire de combustión y para los combustibles gaseosos se mezclan con el aire de combustión ya en el quemador.

Los gases de escape de las plantas de combustión contienen los productos de reacción del combustible y aire de combustión y sustancias residuales como partículas (polvo), azufre, óxidos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. Al

quemar carbón, HCl y HF. Puede estar presente en el gas de combustión, así como en los hidrocarburos y metales pesados en caso de incineración de materiales de desecho. En muchos países, como parte de un programa nacional de protección ambiental, los gases deben cumplir con estrictas regulaciones gubernamentales con respecto al límite. Valores de contaminantes como polvo, óxidos de azufre y nitrógeno y monóxido de carbono. Para cumplir con estos valores límite, las instalaciones de combustión están equipadas con gases de combustión. Sistemas de limpieza como lavadores de gases y filtros de polvo.

1.4. Altura, geometría y características recomendadas

El diseño mecánico de una chimenea incluye el tamaño y la cantidad de fluido a evacuar tanto para el diámetro como para la altura, y para la diferencia de temperatura en los gases como el calor transferido a través de las paredes de la chimenea. Todos estos parámetros de diseño deben estar correctamente calculados a partir del viento, pérdidas y ganancias de calor, fuerzas laterales como sismos, peso de la estructura y su comportamiento con el suelo donde estará ubicada, al igual si esta depende o no de un apoyo externo adicional.

1.4.1. Altura

La altura de una chimenea puede ser diseñada por uno o más factores.

1.4.1.1. Instituciones que velan por el control del medio ambiente

En Guatemala no hay una institución que regule y dictamine la altura adecuada a la que una chimenea debería de liberar sus gases para evitar una

contaminación directa con el ambiente donde se rodea. Pero puede tomarse como referencia la agencia de protección ambiental “Environmental Protection Agency” EPA por sus siglas en inglés, la cual es una institución federal de los Estados Unidos de América, la cual regula las alturas requeridas para chimeneas dependiendo de la topografía, estructuras vecinas, o los gases a evacuar en el sitio.

1.4.1.2. La corriente de aire

Esta es requerida para que el proceso industrial pueda ser ventilado puede ser establecido con la altura de la chimenea.

1.4.1.3. La altura crítica

Que alcanzaría la nube de gases puede crecer debido a la geometría de esta pues al tener una boquilla o una forma truncada en la parte superior, modifica la velocidad con la que se comporta el flujo de los gases para la salida.

1.4.2. Diámetro

El diámetro para el paso de gas generalmente es establecido por el volumen del gas de proceso y corriente disponible. Las velocidades de los gases en una chimenea comúnmente pueden ser de 12 metros/segundo hasta 18 metros/segundo. Aunque esta debe ser regulada para reducir la humedad que podría arrastrar o ser condensada desde la salida de la chimenea. La estabilidad estructural depende de la geometría y por lo tanto también la selección de tamaño y espesor de la pared. El incremento del gas a evacuar con el paso de tiempo y

el aumento de los procesos industriales podría verse modificado por lo cual el diámetro debe estar preparado para estas variaciones del diseño original.

1.4.3. Espesor

El espesor de las paredes de la chimenea muchas veces está relacionado con temas relacionados al comportamiento del peso y su respuesta ante movimientos laterales, así como también con el ambiente que lo rodea y el tipo de gases a expulsar debido a que presentará corrosión en la superficie, debilitando y teniendo como elemento final un espesor de lámina útil menor al originalmente colocado.

- El espesor de las paredes no debe ser menor de 6mm.
- Para ubicaciones de gran altura debe considerarse un espesor de 8mm por corrosión. Aunque de igual manera debe ser aplicada una capa de pintura anticorrosiva.
- Para la parte cónica de la chimenea debido a la inclinación del plano el espesor no debe ser menor al menor espesor de la sección cilíndrica.

1.5. Materiales utilizados en chimeneas industriales

A continuación, se detallan los materiales que comúnmente son utilizados en la elaboración de chimeneas industriales.

1.5.1. Acero ASTM A588

Conocido también como Cor-ten Steel, y a veces llamado como Corten steel es un material de acero, que ha sido desarrollado para eliminar la necesidad de ser pintado, debido a una apariencia estable en su interacción con la corrosión, y

estudiado durante muchos años en su exposición directa con ambientes abrasivos y exigentes con situaciones como ambientes llenos de sulfatos, o altamente corrosivos, ha demostrado ser un material muy versátil para construcciones que estarán expuestas a la intemperie y donde el tema del mantenimiento puede ser complicado. Este cumple con la normativa ASTM – A588 actualmente, aunque originalmente era designado en normativa como ASTM – A242 (Cor – ten A).

2. CRITERIOS DE DISEÑO

Las chimeneas de acero autosoportadas experimentan diversas cargas en direcciones verticales y laterales. Las cargas importantes que una chimenea de acero debe resistir generalmente son cargas de viento, sísmicas y de temperatura además de las cargas debidas al peso propio de la estructura. Los efectos del viento juegan un papel importante en su seguridad como el acero. Las chimeneas por lo general serán estructuras de alturas considerables, por lo cual su sección transversal es de suma importancia pues está sujeta a la presión aerodinámica por la carga del viento.

Los movimientos sísmicos son una consideración de igual importancia para la chimenea debido a que se considera una carga a la cual dicha estructura estará expuesta a lo largo de su vida útil. Este tipo de carga será considerada de naturaleza dinámica, según la disposición del código de provisión se utilizan métodos cuasi estáticos para evaluar esta carga y se recomienda la amplificación de la respuesta normalizada de la chimenea con un factor que depende del suelo y la intensidad del terremoto a analizar, para este caso de estudio se tomarán los valores del lugar de estudio.

En la mayoría de los casos, los gases de combustión con una temperatura muy alta se liberan dentro de una chimenea. Debido a esto se desarrolla un gradiente de temperatura con respecto a la temperatura del ambiente exterior, causado por tensiones en la superficie.

Por lo tanto, los efectos de la temperatura también son factores importantes para ser considerados en el diseño de chimeneas de acero.

Los tipos de cargas que podrían comprometer la integridad estructural de este caso de estudio se enlistan a continuación:

2.1. Cargas laterales

Todas las cargas que pueden ser dinámicas y generar desplazamientos laterales a la estructura, las cuales serán generadas por medios externos, en el ambiente que rodea el caso de estudio. Pudiendo ser:

2.1.1. Fuerzas laterales debido a viento

Ésta carga es el resultado de la presión generada por la corriente de viento que recibe algún rostro o bien proyección lateral de la chimenea industrial. Será de mayor magnitud proporcionalmente a la altura donde se esté analizando, para consideraciones de diseño se tomará la resultante de toda la presión lateral generada por viento. Para estructuras esbeltas sometidas a la carga del viento hay tres acciones principales a considerar:

- Ráfaga del viento
- Vórtices
- Oscilación del anillo ovalado

Las ráfagas del viento desplazan la chimenea en la misma dirección que la carga del viento para una estructura rígida. La ráfaga de viento es independiente de las propiedades dinámicas de la estructura, pero depende de una estructura flexible. Los vórtices ocurren cuando la frecuencia natural de una estructura

corresponde con los vórtices que se desprenden de lados opuestos de la estructura dando como resultado oscilaciones de flujo de gas cruzado.

Las oscilaciones en anillo ovalado son una oscilación ovalada pulsante, por ejemplo, una estructura cilíndrica de una carcasa. Las oscilaciones inducidas por el vórtice ocurren cuando los vórtices se desprenden de lados opuestos de una estructura. Da lugar a una carga fluctuante perpendicular a la dirección del viento.

Cuando se forma un vórtice en un lado de la estructura, la velocidad del viento aumenta en el otro lado. Esto tiene como resultado una diferencia de presión en los lados opuestos y la estructura es sometida a una fuerza lateral alejada del lado donde se forma el vórtice. Como el vertimiento de los vórtices ocurren a la velocidad crítica del viento, primero sucede de un lado y luego de su opuesto, armónicamente la carga lateral varía con la misma frecuencia que la frecuencia del vertimiento del vórtice. Las oscilaciones generadas por el desprendimiento de vórtices pueden ocurrir en estructuras esbeltas como en los cables, chimeneas y torres.

El riesgo de oscilaciones inducidas por vórtice aumenta para estructuras esbeltas y en estructuras en línea con una pequeña distancia entre ellas. Por lo general, el primer nodo es crítico para la eliminación de vórtices en estructuras de acero sometidas a carga de viento, pero en casos raros también el segundo modo es de interés.

El número de Reynold es un parámetro no dimensional que describe la influencia interna de la fricción en la mecánica de fluidos. El número de Reynold se expresa como:

$$Re = \frac{v_w D}{\nu}$$

Donde:

Re=Número de Reynolds

v_w =velocidad del viento

D=Diámetro de la chimenea

ν =Viscosidad cinemática del aire

En general, números grandes de Reynolds “significan flujo turbulento para chimeneas con sección circular, la sección del flujo se encuentra en el rango súper crítico o transcrito para las velocidades del viento de interés práctico” (Visentini, 2014, pág. 18). Como se describen los siguientes rangos a continuación:

Subcrítico $200 \leq Re \leq 1.5 \times 10^5$

Crítico $1.5 \times 10^5 \leq Re \leq 4 \times 10^5$

Supercrítico $4 \times 10^5 < Re \leq 1.0 \times 10^7$

Transcrítico $3.5 \times 10^7 < Re$

Para una chimenea sin vibración la distancia L entre vórtices que giran en la misma dirección es proporcional al diámetro de la chimenea d. En estructuras esbeltas, grandes oscilaciones pueden ocurrir si la frecuencia de desprendimiento de vórtice coincide con la frecuencia natural para la estructura que vibra en un modo en la dirección de viento cruzado, el factor de proporcionalidad para el vertimiento del vórtice se denomina número de Strouhal.

El número de Strouhal se expresa como:

$$St = \frac{f_0 D}{v}$$

Ecuación 1. Número de Strouhal

(Visentini, 2014, pág. 30)

Donde:

St =Número de Strouhal

f_0 =Frecuencia natural

El número de Strouhal describe la dependencia de la sección transversal, la rugosidad de la superficie y la turbulencia del viento. Depende del número de Reynold para un cilindro estacionario y liso; y para una chimenea aeroelástica. El número de Strouhal depende del movimiento de la estructura.

2.1.1.1. Propiedades características del viento cruzado

- Ráfaga neta causada por las fluctuaciones del viento lateral.
- Cargas causadas por el vertimiento de vórtices. La carga se produce ya sea o no en la estructura en movimiento, pero puede depender mucho del tamaño del movimiento. El movimiento podría comenzar a gobernar el vórtice derramado, esta parte de la carga se llama vórtice neto.
- Fuerzas inducidas por el movimiento. Lo más importante es la amortiguación aerodinámica negativa generada por vertido de vórtices.

2.1.1.2. Oscilaciones estructurales de desprendimiento de vórtices

Estas son más probables si:

- El flujo de aire laminar suave que se produce en la atmósfera estable durante el frío que se produce en los días de invierno.

- Aumento a pequeña escala de la turbulencia que se produce a raíz de una estela del vértice esbelto, estructura cercana de un tamaño similar.

Teniendo en cuenta el riesgo de oscilaciones violentas inducidas por vórtices, la amortiguación aerodinámica es de principal importancia.

El número de Scruton es un parámetro adimensional definido como:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_e}{\rho \cdot D^2}$$

Ecuación 2. Número de Scruton

Donde:

Sc=Número de Scruton

δ_s =Decremento logarítmico del amortiguamiento estructural

m_e =Masa equivalente por unidad de longitud de acuerdo al modo considerado

ρ =Densidad del aire

Si una estructura entra en vibración, se disipará la energía según su factor de amortiguamiento. Donde el número de Scruton puede darse según la relación entre el factor de amortiguamiento y la masa de la estructura analizada, lo cual permitiría controlar mejor la amplitud máxima de respuesta producto del desprendimiento de los vórtices en el flujo del viento sobre la chimenea (Visentini, 2014)

2.1.1.3. Mejoramiento de aerodinámica

Existen muchos métodos de prevenir las oscilaciones, para las estructuras esbeltas y tubulares, donde modificando la superficie se logra alcanzar un mejor comportamiento de las estructuras ante los vórtices de viento.

Entre los diferentes tipos de interacción entre la estructura y el flujo del viento, se pueden conseguir diferentes comportamientos que en su mayoría debido a las diferentes presiones aplicadas a diferentes alturas generan oscilaciones, que pueden hacer entrar en resonancia la estructura dependiendo de su período natural, entre los diferentes efectos más importantes pueden ser:

- El galope transversal
- Galope inducido por una estela
- Flameo
- Bataneo
- Desprendimiento y generación de vórtices

El tipo de movimiento aeroelástico de tipo galope transversal, produce movimientos de una amplitud grande en la dirección normal al flujo del viento, a veces se da en las redes de cableado eléctrico.

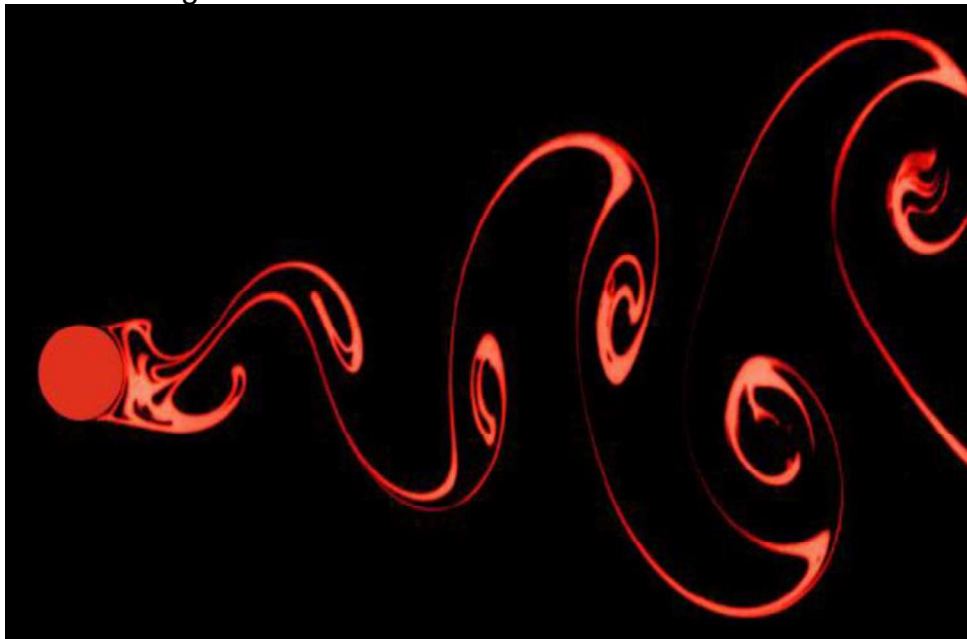
Cuando se tiene un galope inducido por una estela es debido a la reacción sobre algún obstáculo que cambia repentinamente el comportamiento del flujo del viento.

Con el flameo se produce cierta inestabilidad aeroelástica que se genera cuando en algunas velocidades críticas del viento se alcanza por fuerzas en las cuales el flujo produce sobre la estructura analizada en combinación con los diferentes movimientos de esta, se consiguen ciertas amplificaciones hasta lograr cierta tensión considerable la cual puede hacer sobreesforzarse el material.

Cuando las turbulencias o bien alguna otra perturbación en el flujo y su corriente se producen se alcanza la vibración por bataneo, que causa la propia turbulencia de la corriente.

El desprendimiento de los vórtices se da cuando el flujo se separa del objeto que interrumpe su dirección, es característico que produzca un desprendimiento marcado por períodos de vórtices, con una rotación alternada, la cual se conoce como La Calle de vórtices de Von Karman.

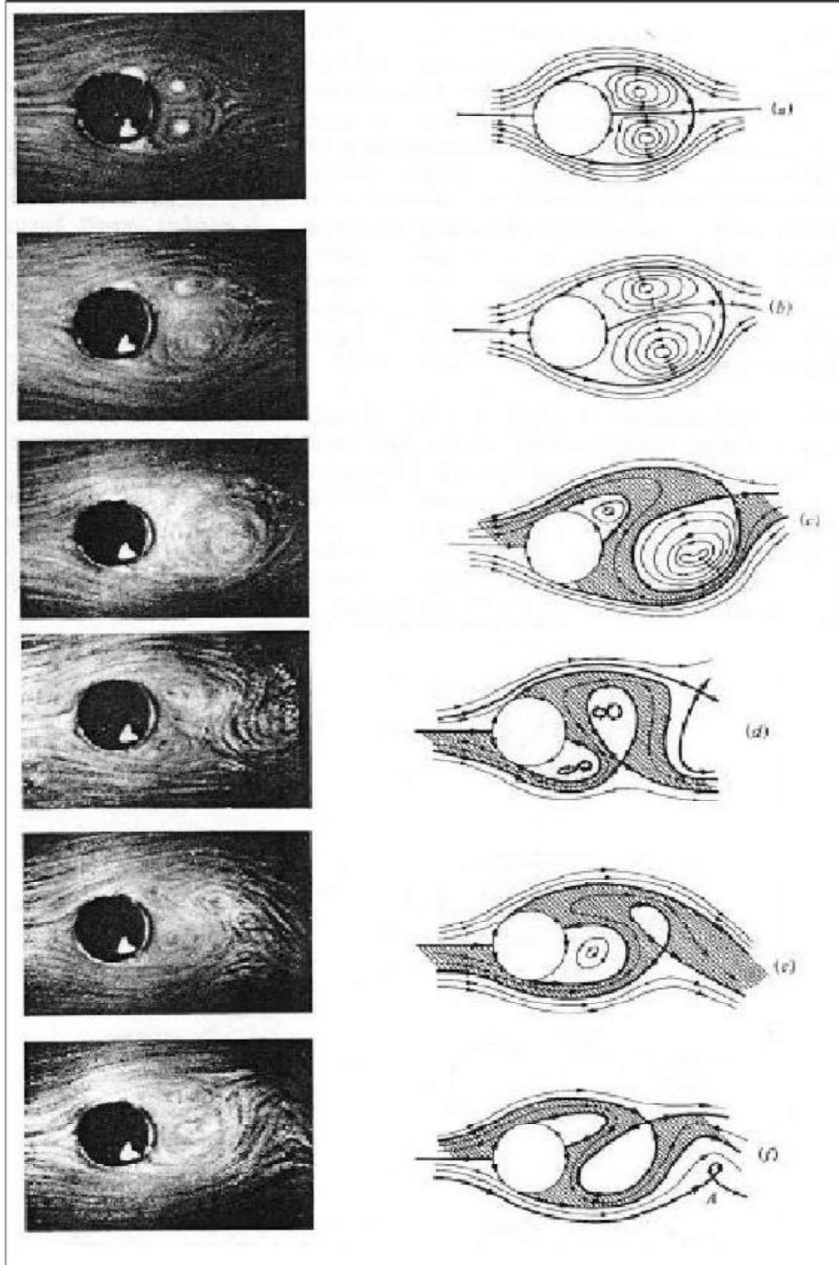
Figura 1. **Calle de Vórtices de Von Karman**



Fuente: Ali (2009) *Análisis de vibraciones aeroelásticas en estructuras esbeltas sometidas a cargas de viento.*

Proceso para el cual se daría la siguiente formación paso a paso:

Figura 2. Fases de calles de vórtices de Von Karman



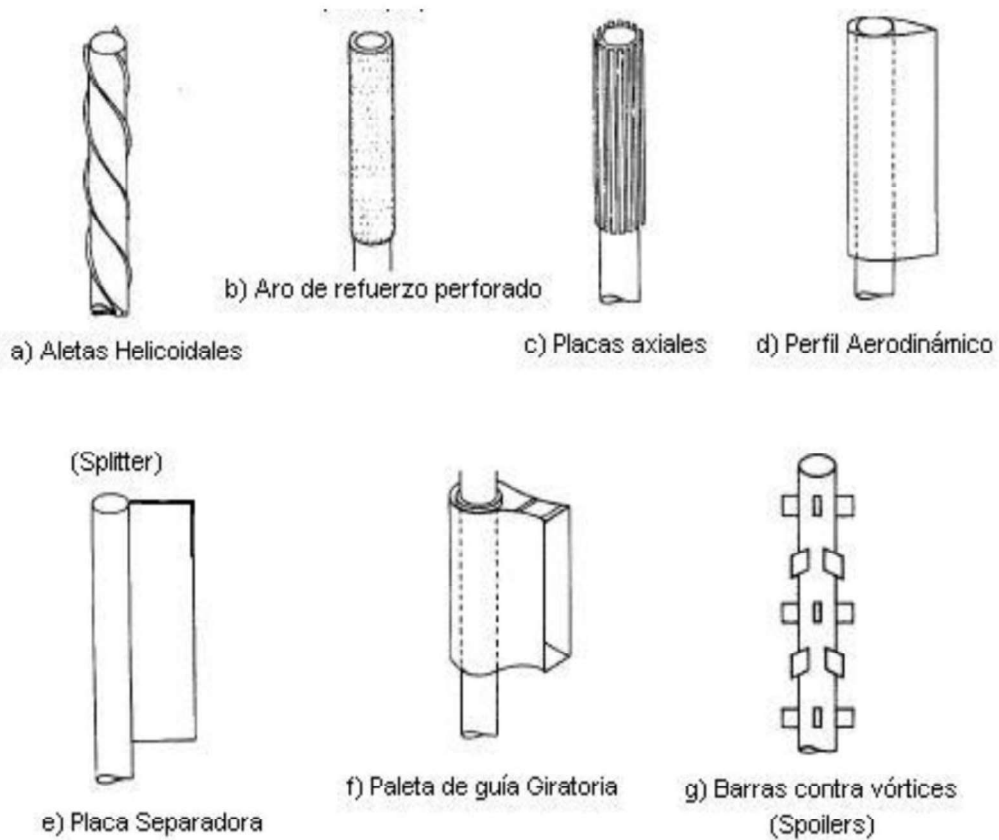
Fuente: Ali (2009) *Análisis de vibraciones aeroelásticas en estructuras esbeltas sometidas a cargas de viento.*

Para poder evitar el efecto de la calle de Von Karman, que sería lo que haría entrar en resonancia a una chimenea, se han venido implementando a lo largo

de los años diferentes métodos o alternativas, como las que se enlistan a continuación:

- Modificar la rigidez de la estructura, cambiando su período para modificar la primera velocidad crítica.
- Aumentar el porcentaje de amortiguamiento donde el número de Scruton sea mayor a 40 y así se podrían abatir los desplazamientos de una forma notable.
- Utilizar elementos o dispositivos que cambian la aparición de vórtices con los cuales pueden utilizarse:
 - Spoilers, que son barras contra vórtices.
 - Mortajas, donde se colocan cuerpos perforados para que rodeen la estructura.
 - Instalar dentro de la estructura algún sistema de amortiguamiento externo, donde podría utilizarse un sistema viscoso adicional, que en consecuencia modificaría el número de Scruton.

Figura 3. **Dispositivos comunes que suprimen vibración inducida por los vórtices de Von Karma**



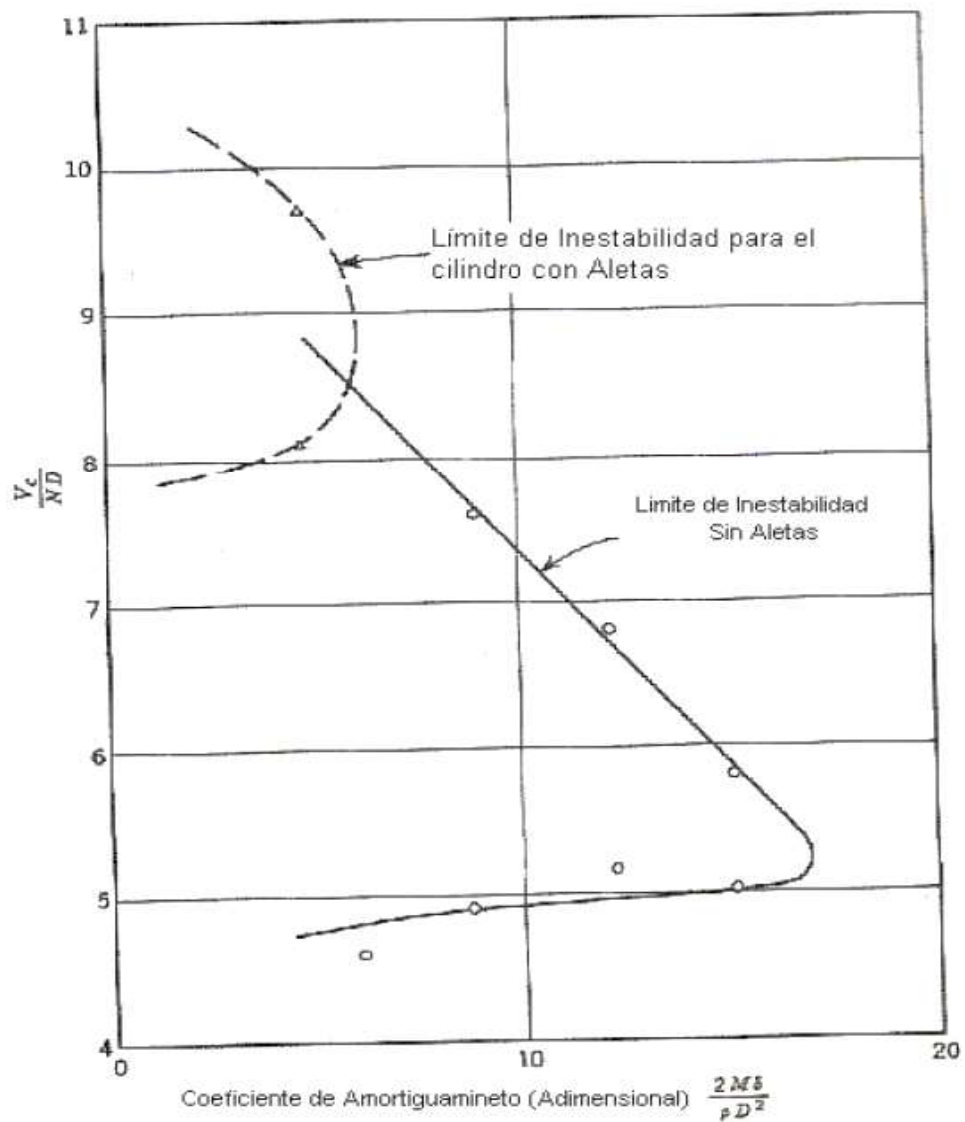
Fuente: Ali (2009) *Análisis de vibraciones aeroelásticas en estructuras esbeltas sometidas a cargas de viento*.

Para la propuesta en este caso de análisis, se utilizarán las aletas Helicoidales las cuales se ubican en el contorno de la chimenea, donde debe mencionarse que la eficacia estará en función de su número.

Según investigaciones realizadas en el Laboratorio de Física Nacional (Teddington, Inglaterra) por Scruton (1957) logró conseguir luego de modelar diferentes distribuciones de las aletas helicoidales, consiguió la separación

óptima de ellas que sería de 12D (doce veces el diámetro de la chimenea) y utilizar 4 aletas helicoidales.

Figura 4. Límites de inestabilidad en una chimenea sin aletas y con aletas helicoidales



Fuente: Ali (2009) *Análisis de vibraciones aeroelásticas en estructuras esbeltas sometidas a cargas de viento*.

2.1.1.4. Fuerzas sísmicas

Debido a la acción sísmica, actúa una carga adicional en la chimenea. Se considera vulnerable porque la chimenea es una estructura muy alta y esbelta. La fuerza sísmica se estima como de naturaleza cíclica para un corto período de tiempo. Cuando la chimenea se somete a carga cíclica, la fricción con el aire, la fricción entre las partículas que construyen la estructura, la fricción en las uniones y el rendimiento de todos los elementos estructurales disminuye la amplitud de movimiento de una estructura que vibra y reduce a la normalidad con el tiempo.

Cuando esta fricción disipa completamente la energía estructural durante su movimiento, la estructura se denomina amortiguada críticamente. Para diseñar estructuras resistentes a terremotos, es necesario evaluar la respuesta estructural al movimiento del suelo y calcular la fuerza respectiva de corte, y los momentos de flexión. Por lo tanto, el movimiento del suelo es el factor más importante para la evaluación sísmica. Para estimar el movimiento del suelo y su respuesta correspondiente de la estructura, depende de la interacción suelo-estructura, rigidez estructural, amortiguación, entre otros.

Para fines de análisis, la chimenea se comporta como una viga en voladizo con deformaciones por flexión, el análisis se llevará a cabo siguiendo algunos lineamientos de diseño, entre los cuales se enlistan los siguientes dos:

- Método del espectro de respuesta (primer modo): este método consta de tres pasos:
 - Período fundamental
 - Fuerza sísmica horizontal
 - Determinar diseño de corte y momentos

Rakshith, Ranjith, Sanjith, y Chethan, (2015) expresa que el período fundamental de la vibración libre se calcula como:

$$T=C_T \sqrt{\frac{W_t \cdot h}{E_s \cdot A \cdot g}}$$

Ecuación 3. Período fundamental de la vibración libre

Donde:

T=Período fundamental de la vibración libre

C_T =Coeficiente dependiente de la proporción de esbeltez de la estructura

W_t =Peso total de la estructura analizada

h=Altura de la estructura sobre la base

E_s =Módulo de elasticidad del material de la cubierta de la estructura

A=Área de sección transversal en la base de la armazón estructural

g=Aceleración debida a la gravedad

La rigidez de la chimenea acampanada es aproximadamente dos veces la de una chimenea prismática, por lo tanto, la estimación conservadora del período de tiempo natural para esta chimenea de acero autoportante será:

$$T_{\text{empírico}} = \frac{T}{2}$$

Ecuación 4. Período empírico

(Sahoo, 2012, p. 37)

- Análisis modal (utilizando espectro de respuesta): el análisis modal es modelado para la chimenea a manera de poder obtener las características dinámicas de la estructura como las frecuencias y las formas de los modos durante la vibración libre de la estructura, es común utilizar un análisis por

medio de elementos finitos, pues el objeto de estudio puede ser analizado arbitrariamente.

2.1.2. Cargas verticales

Las cargas verticales serían las cargas que tengan incidencia en la estructura actuando en sentido gravitacional, tales como:

2.1.2.1. Cargas muertas

Compuestas por todos los elementos sólidos y tangibles de los que estará compuesta la estructura, las cuales deben ser soportados por la geometría de la estructura, entre estas pueden mencionarse:

- Lámina
- Columnas
- Vigas
- Pernos
- Riostras
- Barandas y escalerillas
- Artefactos o implementos para el funcionamiento específico de la chimenea

2.1.2.2. Cargas vivas

Serán todas las cargas móviles que afectarán la estructura en sentido gravitacional, entre estas podrían incluirse las cargas que generará el personal durante operación de la chimenea o bien el personal a ocupar espacios y moverse en la estructura de la chimenea durante su fase constructiva.

2.1.3. Cargas por servicio

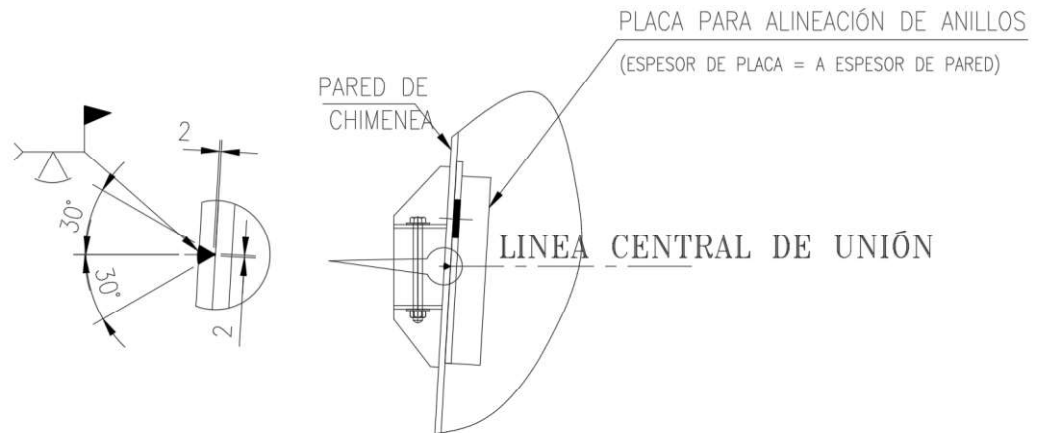
Son las cargas por servicio que serán consideradas para la operación de la estructura debido a que la superficie de la chimenea debe soportar los efectos del gradiente térmico a la gradiente térmica se desarrolla la tensión vertical y circunferencia, estos valores estimados por la magnitud del gradiente térmico en estado estacionario.

2.2. Uniones

Debido a la diferencia de espesores que se puede llegar a proponer en las paredes de la chimenea para optimizar el diseño utilizar diferentes espesores de esta, siendo los más grandes en la base o alturas inferiores y una disminución de estos en los anillos en niveles o cotas superiores, con la finalidad de poder tener una optimización, y concentrar la mayoría de peso en la base, que permitirá tener el centro de gravedad de toda la chimenea a una altura relativamente baja.

Para las conexiones existirán diferentes formas, pero entre ellas puede utilizarse elementos placas verticales a cada 45° del diámetro de la chimenea que serán utilizados como guías, y estos permitirán recibir un anillo superior y posteriormente a este soldarlo como aparece en la ilustración 5, donde se utiliza un bisel a 30° para unir los dos anillos.

Figura 5. **Detalle de conexión para anillos durante montaje de chimeneas**



Fuente: elaboración propia, utilizando SAP 2000 de CSI.

3. CASO DE ESTUDIO

Para el caso de estudio se propone el diseño de una chimenea de 90 metros de altura autosoportada para y así esta investigación pueda ser utilizada como referencia para el proyectista. Se procede a demostrar los cálculos iniciales que son el punto de partida para determinar las medidas de geometría de la chimenea en base a normativas, lineamientos y criterios de funcionamiento.

Se tomará para dimensionar y chequear según requerimientos ambientales la normativa india, la cual es una de las guías más completas que existe con muchos años de aplicación, donde los parámetros iniciales de predimensionamiento y consideraciones son bastante certeras, constando de dos partes, IS6533 Parte I y Parte II, para las cuales en la parte I se procede paso a paso a determinar características de consideración inicial y geometría, mientras que la segunda parte “Parte II” tiene criterios de carga y demanda estructural, donde se comparará con resultados de AGIES y así determinar cuál es la carga más crítica y desfavorable con la que hay que diseñar.

La normativa estadounidense se adaptará y considerará para los materiales que se utilizarán dentro del proyecto.

3.1. Normativas y lineamientos de diseño

A continuación, se detallan y explican las normativas y los lineamientos de diseño.

3.1.1. IS 6533 (Parte 1): 1989

Normativa hindú para prácticas de diseño y construcción de torres o chimeneas de acero, enfocado en los aspectos mecánicos la cual incluye:

- Determinación de diámetros.
- Determinación de altura de la chimenea en base a las normas de polución y de dispersión de gases in la atmósfera.
- Estimación de pérdidas de flujo.
- Requerimientos generales para los materiales de construcción, recubrimientos, forros y revestimientos.

3.1.2. IS 6533 (Parte 2): 1989

Esta parte del código hindú para diseño y construcción de chimeneas se enfoca en los aspectos estructurales, lo cual incluye:

- Material de construcción para pernos, láminas, remaches y soldadura.
- Cargas y sus combinaciones.
- Aspectos generales del diseño, como espesores mínimos, esfuerzos y deflexiones permisibles, así como también el chequeo de fuerzas dinámicas y el chequeo de resonancia.

3.1.3. ASTM STS

Esta normativa cubre diferentes partes de la chimenea de acero, presenta consideraciones que deben ser realizadas para el diseño mecánico y estructural,

entre los cuales podrían ser mencionados los siguientes:

- Diseño mecánico: elección de tamaño (altura, diámetro, tamaño), pérdidas de calor, materiales, recubrimientos y revestimientos.
- Diseño estructural: tipos de construcción, materiales, esfuerzos permisibles, cargas aplicables, cimientos, vibración, respuestas dinámicas, respuestas sísmicas, prevención de vibración excesiva.
- Plataformas de acceso.
- Fabricación e izaje.
- Inspección y mantenimiento.
- Requerimientos de prueba y expresiones matemáticas.

3.1.4. AGIES

Normativa guatemalteca que propone diferentes consideraciones para el espacio donde será ubicado el proyecto, referente a características como:

- Tipo de suelo
- Índice sísmico
- Fuerzas de viento

3.2. Materiales, geometría y aspectos de diseño

A continuación, se dan a conocer los materiales, geometría y aspectos de diseño.

3.2.1. Material para utilizar para la placa será acero ASTM A36

Según la ubicación del proyecto se tiene alta presencia de sulfatos debido a la cercanía con el mar, lo cual genera un proceso mayor en la degradación del material de la chimenea, se plantearán planchas de acero que contemplarán recubrimiento y varias capas de pintura para garantizar que la superficie estará segura ante este tipo de ambientes altamente corrosivos.

3.2.2. Diámetro

De la tabla I de *Recommended height to diameter ratio of steel chimney* de IS6533 parte I, para la altura de diseño de 90 metros, los diámetros comúnmente utilizados para la estructura están comprendidos entre 355 y 315 centímetros, para cubiertas sin revestimiento, como se muestra a continuación:

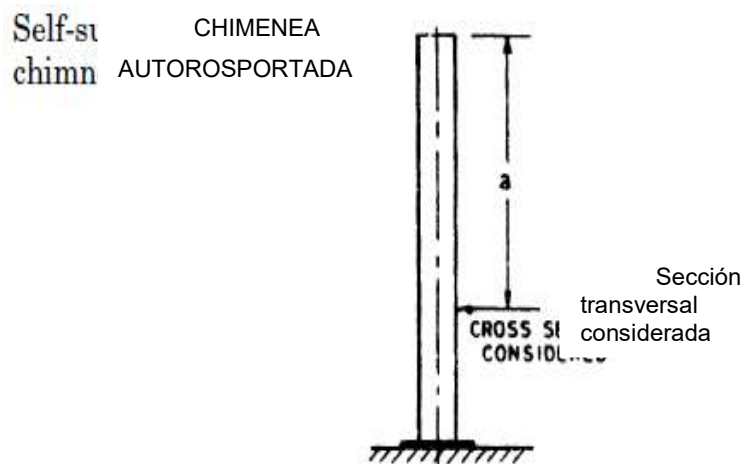
Tabla I. **Altura recomendada según el diámetro de la chimenea autoportada**

Diámetro nominal de chimenea (cm)		Altura de chimenea (m)														
Pared simple	Pared doble	1 5	2 0	2 5	3 0	3 5	4 0	4 5	5 0	5 5	6 0	7 0	8 0	9 0	10 0	11 0
50		x														
60		x														
80	50	x														
100	60		x													
120	80		x	x												
140	100			x	x											
160	120				x	x	x	x								

3.2.3. Sección

Se considera una altura efectiva según IS6533 parte 2 (1989) sugiere que la altura efectiva en una chimenea autoportada se puede medir a partir de la sección circular uniforme, lo cual deja la altura que tiene forma cónica, en este caso de estudio, dicha altura efectiva sería igual a 2/3 de la altura, lo cual sería de 60 metros, sobre los 30 metros de sección cónica.

Figura 6. Descripción de altura efectiva para una chimenea autoportada



Fuente: IOP (2018) *Effective height of chimney for biomass cook stove simulated by computational fluid dynamics.*

3.3. Información de diseño

La siguiente información es presentada según las características que son necesarias en el proyecto a concebir, cumpliendo los requerimientos de proceso para poder realizar de manera eficaz el mismo y brindar una estructura segura.

Capacidad de proceso de secado: $Q = 600 \frac{1}{Q} = 1.667 \times 10^{-4} \frac{m^3}{1}$

Cantidad de secadores: $n=1$

Densidad de combustible: $d_{\text{combustible}} = 0.9 \frac{kg}{l}$

Cantidad de combustible quemado: $w_{\text{combustible}} = 540 \frac{kg}{hr}$

Contenido de Azufre: 4 % del total de combustible = $540 \text{ kg} \times 4 \% = 247 \text{ kg/hr}$

Rangos de volumen estimado: $V_{\text{emisión}} = 80,000 \frac{m^3}{hr} = 22.22 \frac{m^3}{seg}$

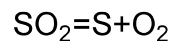
Parte de la chimenea con sección cónica

$$H_{\text{cónica}} = \frac{H_{\text{Total}}}{3} = 30\text{m}$$

Ecuación 5. Altura con sección cónica.

3.3.1. Determinación de altura

Considerando que 1 mol de azufre reaccionará con 1 mol de dióxido de carbono:



Composición de un mol de azufre

El peso relativo del peso del azufre es de 32 g y el del oxígeno es de 16 g. mientras que el peso atómico del SO_2 producido de 32 g de Azufre es de 64 g, por lo que puede afirmarse que el peso del SO_2 es el doble del peso atómico del azufre quemado.

Contenido de SO_2 expulsado por hora equivale a:

$$Q_{SO_2} = 129.6 \frac{Kg}{hr} = 3.60 \times 10^{-02} \frac{kg}{s}$$

Las chimeneas son necesarias para liberar contaminantes en la atmósfera a manera de mantener una calidad de aire aceptable en la superficie donde se desarrolla la vida humana, fauna y flora. La altura propuesta de la chimenea debe cumplir con diferentes requerimientos como la tasa de volumen de emisiones, velocidad de flujo, temperatura de los gases, condiciones topográficas, condiciones meteorológicas del lugar donde se ubicará **el proyecto, siendo estos: el requerimiento ambiental y el requerimiento por normativa.**

3.3.1.1. Determinación de altura mínima según requerimiento ambiental

Este valor será una altura a partir de la cual se considera seguro la liberación de los gases involucrados en función del contenido SO₂ expulsado a la atmósfera según lo que indica para proteger el ambiente (Ministerio de Ambiente de la India, 2002).

$$H_{\text{torre}} = 14 * \left(\frac{Q_{\text{SO}_2}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}} \right)^{0.3} * 1\text{m} = 14 * \left(\frac{129.6}{1 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}} \right)^{0.3} * 1\text{m} = 60.24\text{m}$$

Altura de la torre recomendada según cantidad producida de azufre

3.3.1.2. Determinación de altura según requerimiento por normativa

Según los parámetros descritos en el inciso 3.3.9 se presenta la siguiente fórmula, planteada por la normativa de la India por sus siglas en inglés ISEN su documento IS, *Design and construction of steel chimney - Code of practice part*

1: *Mechanical aspect*, (2002) en el anexo B, presenta la siguiente toma en cuenta factores reales del funcionamiento al cual estará sometida la misma.

$$H_{\text{torre}} = \left(\frac{AMFD}{8CV} \right)^{\frac{3}{4}}$$

Altura de la torre recomendada según normativa IS, anexo B

Donde:

$$H_{\text{torre}} = \text{Altura necesaria}$$

A=Coeficiente de gradiente de temperatura de la atmósfera donde se mezclara de forma vertical y horizontal los gases expulsados

(para zona tropical A=280, para zona semi tropical A=240.

M=tasa de masas contaminantes a expulsar en g/s

F=Coeficiente adimensional de la tasa de precipitación, para gases F=1

para retención partículas granulares como polvo F=2

Dependiendo de la eficiencia del proceso de retención de polvo los factores varían:

90 % o más, entonces F=2.0

de 75 % a 90 %, entonces F=2.5

menor a 75 % o más, entonces F=3.0

C=concentración de contaminación en $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ máximo permisible a nivel de suelo máximo

A temperatura y presión estándar puede tomarse como referencia $0.5 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ a menos que las autoridades que velan por la salud, contaminación e impacto ambiental consideren lo contrario y proporcionen un parámetro diferente a éste.

V=Volumen estimado de tasas de emisión de gases totales en $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

D=Diámetro de la chimenea en el punto de salida en m

Sustituyendo en la fórmula siguiente:

$$H_{\text{torre}} = \left(\frac{\text{AMFD}}{8\text{CV}} \right)^{\frac{3}{4}} = \left(\frac{A_{\text{tropical}} \left(\frac{Q_{\text{SO}_2}}{1 \frac{\text{gm}}{\text{s}}} \right) * F_{\text{dust}} * \left(\frac{d_{\text{assumed}}}{1\text{m}} \right)^{\frac{3}{4}}}{8 * \left(\frac{C_{\text{perm}}}{1 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}} \right) * \left(\frac{V_e}{1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \right)} \right)^{\frac{3}{4}} * 1\text{m}$$

Altura de la torre recomendada según normativa IS, anexo B

Con los siguientes datos:

$$A_{\text{tropical}} = 280$$

$$C_{\text{perm}} = 0.5$$

$$V_e = 22.22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{SO}_2} = 3.60 \times 10^1 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{assumed}} = 3\text{m}$$

$$F_{\text{dust}} = 1.5$$

Se obtiene un resultado de $H_{\text{torre}} = 87.386\text{m}$

Velocidad de salida de gas: $V_{\text{Salida de O}_2} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Cantidad de salida de gas: $Q_{\text{gas}} = 22.22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Diámetro interno recomendado en la parte superior de la chimenea:

$$D_{\text{top}} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi * V_{\text{Salida de O}_2}}} = 1.19\text{m}$$

Diámetro en la parte superior de la chimenea

Es necesario mencionar que este diámetro recomendado, pero el aspecto prioritario en este parámetro de geometría de la chimenea es la velocidad, mientras esta no exceda los 30 m/s. El rango óptimo de la velocidad de expulsión de gases debería de estar dentro del rango de 15 a 20 metros sobre segundo.

Diámetro interno y mínimo en la parte cilíndrica de la chimenea:

$$D_{\text{chimenea}} = \frac{H_{\text{stack}}}{20} = \frac{60.24}{20} = 3.01\text{m}$$

Diámetro en parte cilíndrica de chimenea

Según la normativa IS en su tabla I que presenta *Mechanical Rakshith, Ranjith, Sanjith, y Chethan, (2015)* hay recomendaciones de la relación entre la altura de la chimenea y diámetros sugeridos, el diámetro para una chimenea sin recubrimiento se encuentra aproximadamente en 355 centímetros, en este proyecto se propondrá por facilidad constructiva utilizar un $D_{\text{chimenea}} = 3.60 \text{ m}$.

Diámetro interno y mínimo en la parte inferior (cónica) de la chimenea:

$$D_{\text{base}} = 1.6D_{\text{top}} = 5.76\text{m}$$

Diámetro en base de chimenea

3.3.2. El espesor mínimo de la pared de la chimenea

En una o varias construcciones o capas de esta debe ser calculada a partir de las consideraciones de deflexión y seguridad sobre los esfuerzos a cubrir, pero no debe ser menor a 6.00 mm o el espesor obtenido de 1/500 del diámetro exterior, por lo cual se procede a calcular el espesor mínimo:

$$T_{\text{min}} = \frac{D_{\text{top}}}{500} = 0.0072\text{m} \approx 8\text{mm}$$

Espesor mínimo de pared

Siendo 8 mm mayor a 6mm, se procede a tomar de referencia como espesor mínimo para el proyecto 8mm.

Espesor debido a corrosión exterior: (ambiente) es según la tabla I (IS, Design and construction of steel chimney - Code of practice part 2: Structural aspect, 2002) para acero que no utiliza cobre:

$$T_{ce}=3 \text{ mm}$$

Espesor de pared debido a corrosión de ambiente

Espesor debido a corrosión interior, debido a procesos, es según la tabla I para acero que no utiliza cobre (Structural aspect, 2002)

$$T_{ci}=5 \text{ mm}$$

Espesor de pared debido a gases expulsados

Espesor total por ejecutar en proyecto de la pared:

$$T_{Total}=T_{min}+T_{ce}+T_{ce}=12.3 \text{ mm}$$

$$T_{A \text{ usar}}=13 \text{ mm}$$

Espesor tentativo según aspectos ambientales de chimenea

Este espesor requerido por criterios ambientales será comprobado más adelante con cálculos para asegurar la estructura

3.3.3. Determinación de esfuerzos permisibles

A continuación, se da a conocer la determinación de los esfuerzos permisibles.

3.3.3.1. Esfuerzos para chimeneas circulares permisibles

Para obtenerlos se utilizan las propiedades del material utilizado las directrices proporcionadas en la normativa hindú para obtener esfuerzos máximos donde intervienen 2 parámetros, siendo estos la relación de altura/diámetro y diámetro/espesor. Se calculan y se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares, como ejemplo:

$$\text{Relación } H/D = 90\text{metros} / 3.60 \text{ metros} = 25$$

$$\text{Relación } D/t = 3.60\text{metros} / 0.013 \text{ metros} = 276.92$$

Según la tabla II que presenta *Maximum permissible stress for circular chimneys* y las relaciones obtenidas para este proyecto, el valor de esfuerzo permisible sería de 87MPa.

Tabla II. **Esfuerzos máximos permisibles para chimeneas circulares**

Relación h e/D	Esfuerzo máximo permisible en MPa, según la relación Diámetro/Espesor (D/t)														
	h _a sta	140	50	60	70	80	90	00	25	50	00	50	00	50	00
Hasta 12	6	24	23	20	15	15	12	05	9	7	8	0	4	8	
13	8	07	05	03	9	9	6	0	5	5	7	0	5	0	
14	89	8	6	5	1	1	9	4	0	2	5	0	5	1	
15	72	1	0	9	6	6	4	0	7	0	5	0	7	4	
16	59	8	7	6	4	4	2	9	6	1	6	3	0	7	
17	48	8	7	6	4	4	3	0	8	3	0	7	4	2	
18	40	0	9	8	7	7	6	3	1	8	5	2	0	9	
19	33	3	3	2	1	1	0	8	6	3	1	9	7	6	
20	28	8	8	7	6	6	5	4	2	0	8	6	4	3	
21	24	4	4	3	2	2	2	0	9	7	5	3	2	1	
22	21	1	0	0	9	9	9	7	6	4	3	2	1	0	
23	18	8	8	7	7	7	6	5	4	3	1	0			
24	16	6	5	5	5	5	4	3	2	1	0				
25	14	4	4	3	3	3	3	2	1	0					

Fuente: Indian Standard (2002). *Design and construction of steel chimney - Code of practice part 2: Structural aspect.*

Donde:

t= espesor de pared de chimenea en el nivel analizado

h_e= altura efectiva para considerar el pandeo en m

D=Diámetro de la chimenea en el punto de salida en m

El esfuerzo permisible del material acero es de $F_y=250\text{MPa}$, en tensión es un 60 % de este valor

$$f_{y \text{ tensión acero}} = 0.60 * f_y = 150\text{MPa}$$

Esfuerzo permisible del acero a tensión

Se tomará una eficiencia de las soldaduras de un 85 %, con estos datos se obtiene el esfuerzo permisible de las piezas de acero a tensión, que sería:

$$f_{y \text{ tensión chimenea}} = 0.85 * f_{y \text{ tensión acero}} = 127.50\text{MPa}$$

Esfuerzo permisible en la chimenea a tensión.

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50\text{MPa}$$

Esfuerzo permisible del acero a cortante.

Determinación de peso de chimenea

$$W_s = \int_{H_i}^{H_T} (\pi * d_{\text{top}} * T_t * \rho_{\text{acero}}) dh$$

Determinación de peso de chimenea mediante integral definida según su altura de análisis y parámetros que intervienen en ella como el espesor.

Temperatura del humo promedio, según el proceso y debido a que es una caldera se manejarán temperaturas aproximadamente de 200 °C.

3.4. Combinaciones de carga

Para las combinaciones de carga se utilizará una mezcla de las combinaciones sugeridas por AGIES y por otro lado normativa de origen hindú,

pues estas tienen un apartado especial para chimeneas. Por lo tanto, serían las siguientes combinaciones de carga:

Combinaciones de carga propuestas por AGIES para diseñar por método de resistencia:

- CR1: 1.4 Carga muerta
- CR2: 1.3 Carga muerta + 1.6 Carga viva + 0.5 Carga de lluvia
- CR4: 1.2 Carga muerta + 1.0 Carga viva \pm 1.0 Carga sísmica
- CR6: 1.2 Carga muerta + 1.0 Carga viva + 1.3 Carga de viento + 0.5 Carga de lluvia
- CR7: 0.9 Carga muerta \pm 1.3 Carga de viento
- CR8: CR1 + 1.4 Presión de fluidos
- CR9: CR2 + 1.2 Presión de fluidos + 1.6 Presión de suelos
- CR12: CR9 + 1.2 Esfuerzos generados por temperatura

Combinaciones de carga propuestas por IS 6533 parte 2 – 1989 para diseñar por método de resistencia:

- Carga muerta + Carga de viento
- Carga muerta + Carga sísmica
- Carga muerta + Carga de revestimiento + Carga impuesta en plataformas de servicio + carga de viento
-

3.5. Cálculo de carga sísmica

Se consideran los siguientes factores para el cálculo del espectro de respuesta sísmica.

Datos de ubicación:

- Departamento: Escuintla
- Municipio: La Democracia

Tabla III. **Datos y parámetros para definir espectro de respuesta para la Democracia, Escuintla, Guatemala**

DATOS PARA ESPECTRO DE RESPUESTA		
Ordenada Espectral Del Periodo Corto	Scr	1.770
Ordenada Espectral Con Periodo De 1 Segundo	S1r	1.220
INDICE DE SISMICIDAD (Anexo A, Lista De Amenaza Sísmica Por Municipios)	Io	4.200
Tipo De Obra		Ordinaria
Clase De Sitio	Cs	C
TIPO DE FUENTE SISMICA (Tabla 4.5)	FUE NTE	A
DISTANCIA HORIZONTAL CERCANA A LA FUENTE SISMICA (Tabla 4.6)	DIST	5km
Tipo De Sismo		Ordinario
Factor Generico De Reduccion De Respuesta Sismica	R	3.000

Fuente: elaboración propia, adaptado de AGIES (2018) *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*.

Deben realizarse los ajustes respectivos según AGIES para la clase de sitio y un ajuste por intensidades sísmicas especiales como se define a continuación:

Tabla IV. **Ajustes especiales según la clase de sitio**

AJUSTE POR CLASE DE SITIO		
Coeficiente de sitio	F_a	1.0
		00
Coeficiente de sitio	F_v	1.0
		00
Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés $S_{cs} = S_{cr} * F_a$	S_{cs}	1.7
		70
Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con período de vibración de 1 seg. $S_{1s} = S_{1r} * F_v$	S_{1s}	1.2
		20

Fuente: elaboración propia, adaptado de AGIES (2018) *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*.

Tabla V. **Ajustes por las intensidades sísmicas**

AJUSTE POR INTENSIDADES SÍSMICAS ESPECIALES		
Coeficiente de sitio (tabla 4-6)	N_a	1
		.000
Coeficiente de sitio (tabla 4-3)	N_v	1
		.000
Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés $S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a$	S_{cs}	1
		.770
Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con período de vibración de 1 seg. $S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v$	S_{1s}	1
		.220

Continuación tabla V.

Período de transición $= S_{1d} / S_{cd}$	T_s	T_s	0.689
--	-------	-------	---------

Fuente: elaboración propia. *adaptado de AGIES (2018) Normas de Seguridad Estructural para Guatemala.*

Con los valores ya ajustados al tipo de proyecto y las condiciones especiales del lugar se debe realizar una calibración de los valores para que sean tomados en cuenta previo a calcular las aceleraciones que generará el evento sísmico.

Tabla VI. **Ajustes especiales según la clase de sitio y las intensidades sísmicas**

ESPECTRO CALIBRADO AL NIVEL DE DISEÑO REQUERIDO		
	S_{cs}	1.770
	S_1	1.220
FACTOR ESCALA	K_d	0.660
Ordenada espectral para diseño requerido $S_{cd} = K_d * S_{cs}$	S_c	1.680
Ordenada espectral para diseño requerido para 1 seg. $S_{1d} = K_d * S_{1s}$	S_1	0.850
Aceleración máxima del suelo	MS_d	0.467
Componente vertical del sismo de diseño	S_v	0.234
SISTEMA ESTRUCTURAL	Torres con arriostramientos, o tensores al suelo y chimeneas	
Continuación tabla VI.	K_T	0.049
	α	0.750
	R	3.000
	Ω_r	2.000
	C_d	2.500

Fuente: elaboración propia, adaptado de AGIES (2018) *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*.

3.6. Espectro de respuesta

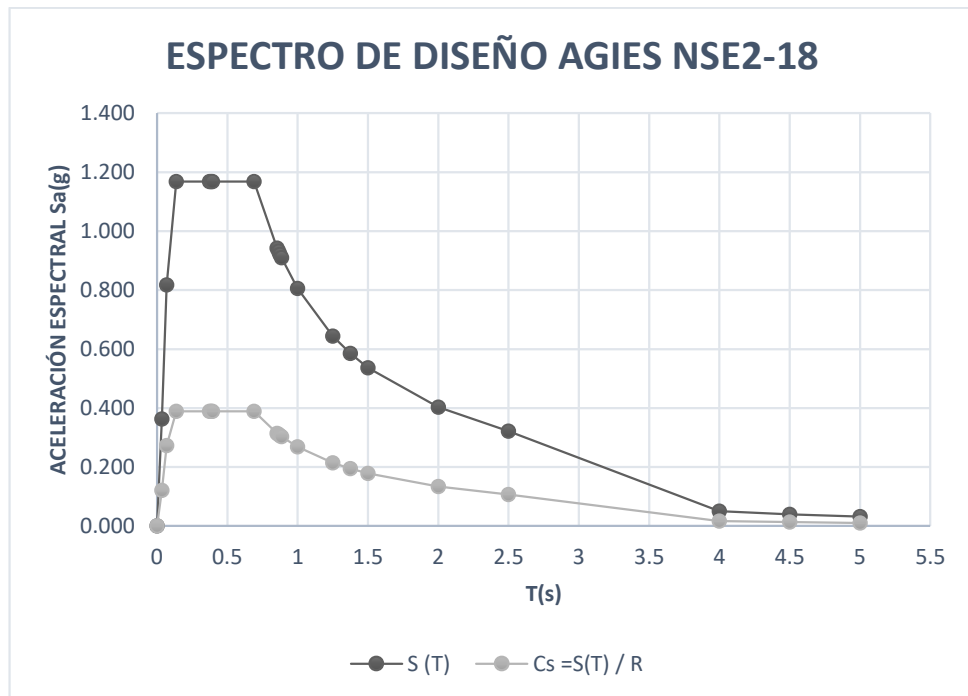
Aceleraciones de ondas sísmicas, según el tiempo transcurrido durante el sismo.

Tabla VII. Resultados de períodos y aceleraciones que construyen el espectro de respuesta para La Democracia, Escuintla, Guatemala

T_s	S (T)	C_s =S(T) / R
0	0.000	0.000
0.034	0.363	0.121
0.069	0.818	0.273
0.138	1.168	0.389
0.375	1.168	0.389
0.385	1.168	0.389
0.395	1.168	0.389
0.689	1.168	0.389
0.855	0.942	0.314
0.865	0.931	0.310
0.875	0.921	0.307
0.885	0.910	0.303
1.000	0.805	0.268
1.25	0.644	0.215
1.375	0.586	0.195
1.5	0.537	0.179
2	0.403	0.134
2.5	0.322	0.107
4	0.050	0.017
4.5	0.040	0.013
5	0.032	0.011

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Espectro de respuesta para La Democracia, Escuintla, Guatemala**



Fuente: elaboración propia, utilizando SAP 2000 de CSI.

3.7. Esfuerzo debido a peso propio

El peso propio de la chimenea generará esfuerzos sobre la misma al momento de estar completamente erguida sobre su eje central y sin apoyos adicionales o temporales debidos a la construcción, la gravedad generará esfuerzos en sentido vertical, los cuales podrán calcularse en el material con la siguiente ecuación:

$$f_s = \frac{W_s}{\pi d T_t}$$

Esfuerzo en la chimenea debido a peso propio

Donde:

W_s = peso de los anillos de la chimenea sobre la sección transversal (kN)

d=Diámetro de la chimenea (m)

T_T=Espesor de lámina total (m)

3.7.1. Determinación de carga de viento según normativa hindú

Para apoyo de esta se utiliza "IS: 875 (Part 3): *Wind Loads on Buildings and structures - Proposed Draft & commentary*" en la sección 5.3 donde intervienen 5 diferentes variables, en la siguiente ecuación de (Krishna, 2005).

$$V_z = V_b * k_1 * k_2 * k_3 * k_4$$

Velocidad del viento a una altura "Z" específica

Donde:

V_z=Velocidad del viento a altura Z

V_b=Velocidad básica del viento en la zona

k₁=Factor de probabilidad (coeficiente de riesgo)

k₂=Factor de terreno, altura y tamaño de estructura

k₃=Factor de topografía

En el caso de la velocidad básica del viento en la zona se tomará como referencia la velocidad que utiliza AGIES según registros de Insivumeh; para factor de probabilidad (k₁) se considera velocidades picos para que el diseño pueda ser basado sobre una tormenta máxima o severa durante la vida útil del proyecto. Para el factor k₂ el código define 4 tipos de terrenos y clasifica también según la dirección del viento, por lo tanto, se debe tener en mente el desarrollo futuro del área que lo rodea si es que también se harán estructuras u obras que pudiesen afectar el flujo del viento y la corriente, debido a que normalmente se construyen las chimeneas en complejos industriales.

La categoría de terreno 1: es un terreno abierto sin obstrucciones o con muy pocas, donde la altura media de alguno de estos objetos es menor a 1.50 metros. Las costas marítimas y llanuras sin árboles entrarían en esta categoría.

Para la categoría de terreno 2: es para un terreno abierto pero que contempla obstrucciones dispersas entre sí, con alturas comprendidas entre 1.50 y 10 metros. Tomando, éste es el criterio para medir la velocidad básica del viento regional incluyendo aeropuertos, parques abiertos y zonas no desarrolladas en las afueras escasamente urbanizadas de las ciudades y suburbios. Terrenos junto a la costa del mar también puede ser clasificado en esta categoría debido a la rugosidad de las olas del mar y a los fuertes vientos.

Dentro de la categoría de terreno 3 se incluyen todos aquellos con numerosas obstrucciones donde el espacio entre las mismas es bajo, con alturas de hasta 10 metros de altura, con o sin pocas estructuras altas aisladas, en esta categoría se incluyen áreas muy arboladas, ciudades y zonas industriales total o parcialmente desarrolladas.

Todos aquellos proyectos dentro de centros de ciudades con muchas obstrucciones serán clasificadas dentro de la categoría 4, así como también los lugares donde haya obstrucciones más altas a 25 metros y complejos industriales altamente desarrollados.

Para la clasificación de las estructuras, se dividen en 3 clases: A, B y C, lo cual está en función de dimensiones horizontales y verticales, como se describe a continuación.

- Clase A: estructuras y sus componentes, tales como revestimientos, cristales, techos, entre otros, que tienen dimensión máxima (su mayor dimensión horizontal o vertical) menor a 20 metros.
- Clase B: estructuras y sus componentes, tales como revestimientos, cristales, techos y similares donde la mayor dimensión entre horizontal y vertical entre 20 y 50 metros.
- Clase C: componentes, donde la mayor dimensión entre horizontal y/o vertical es superior a 50 metros.

-

El efecto k_3 de la topografía, afecta en mayor manera cuando la pendiente contra el viento es mayor a 3 grados, ya que con una pendiente menor el valor k_3 estaría en un rango de 1 a 1.36.

Tabla VIII. Factores k2 dependiendo de categoría y tipo terreno

Altura (m)	Categoría de Terreno 1			Categoría de Terreno 2			Categoría de Terreno 3			Categoría de Terreno 4		
0	.05	.03	.99	.00	.98	.93	.91	.88	.82	.80	.76	.67
5	.09	.07	.03	.05	.02	.97	.97	.94	.87	.80	.76	.67
0	.12	.10	.06	.07	.05	.00	.01	.98	.91	.80	.76	.67
0	.15	.13	.09	.12	.10	.04	.06	.03	.96	.97	.93	.83
0	.20	.18	.14	.17	.15	.10	.12	.09	.02	.10	.05	.95
00	.26	.24	.20	.24	.22	.17	.20	.17	.10	.20	.15	.05
50	.30	.28	.24	.28	.25	.21	.24	.21	.15	.24	.20	.10
00	.32	.30	.26	.30	.28	.24	.27	.24	.18	.27	.22	.13
50	.34	.32	.28	.32	.31	.26	.29	.26	.20	.28	.24	.16
00	.35	.34	.30	.34	.32	.28	.31	.28	.22	.30	.26	.17
50	.37	.35	.31	.36	.34	.29	.32	.30	.24	.31	.27	.19
00	.38	.36	.32	.37	.35	.30	.34	.31	.25	.32	.28	.20
50	.39	.37	.33	.38	.36	.31	.35	.32	.26	.33	.29	.21
00	.40	.38	.34	.39	.37	.32	.36	.33	.28	.34	.30	.22

Fuente: Krishna (2005) *Wind Loads on Buildings and structures - Proposed Draft & commentary.*

3.8. Chequeo de espesor

Una proyección de la chimenea de acero se somete a un esfuerzo a tracción, producto de un efecto combinado con el viento y el peso de la chimenea

de acero. El peso del recubrimiento se omitirá en el cálculo de la tensión máximo, ya que la presión máxima del viento puede actuar sobre la chimenea de acero antes de que se haga el revestimiento en fase constructiva, que sería el caso crítico. Para el cálculo del esfuerzo sería:

$$Q_t = \left(\frac{4M_w}{\pi d^2 t} - \frac{W_s}{\pi d t} \right) < \left(\frac{M_w}{250 \pi d^2 t} - 0.079h \right) \text{N/mm}^2$$

Chequeo de espesor donde se somete a tracción la pared de
acero

3.9. Consideraciones previo a análisis

Generalmente la altura de los anillos es de 10 metros debido a temas constructivos, para contar con facilidades de montaje y transporte de piezas, el espesor de los anillos no debe ser menor al recomendado en las normativas respectivas. El espesor final de la estructura será la suma entre el espesor calculado necesario para resistir los esfuerzos actuantes más el espesor requerido por temas ambientales; según la ubicación geográfica que tenga el proyecto y los gases a expulsar, la corrosión es un tema crítico que se presentará en el período de vida útil de la chimenea; en su mayoría de casos los espesores varían desde 2 mm, 3 mm, y 5mm para la corrosión que generalmente se presentan en este tipo de proyectos en una vida útil de 20 años.

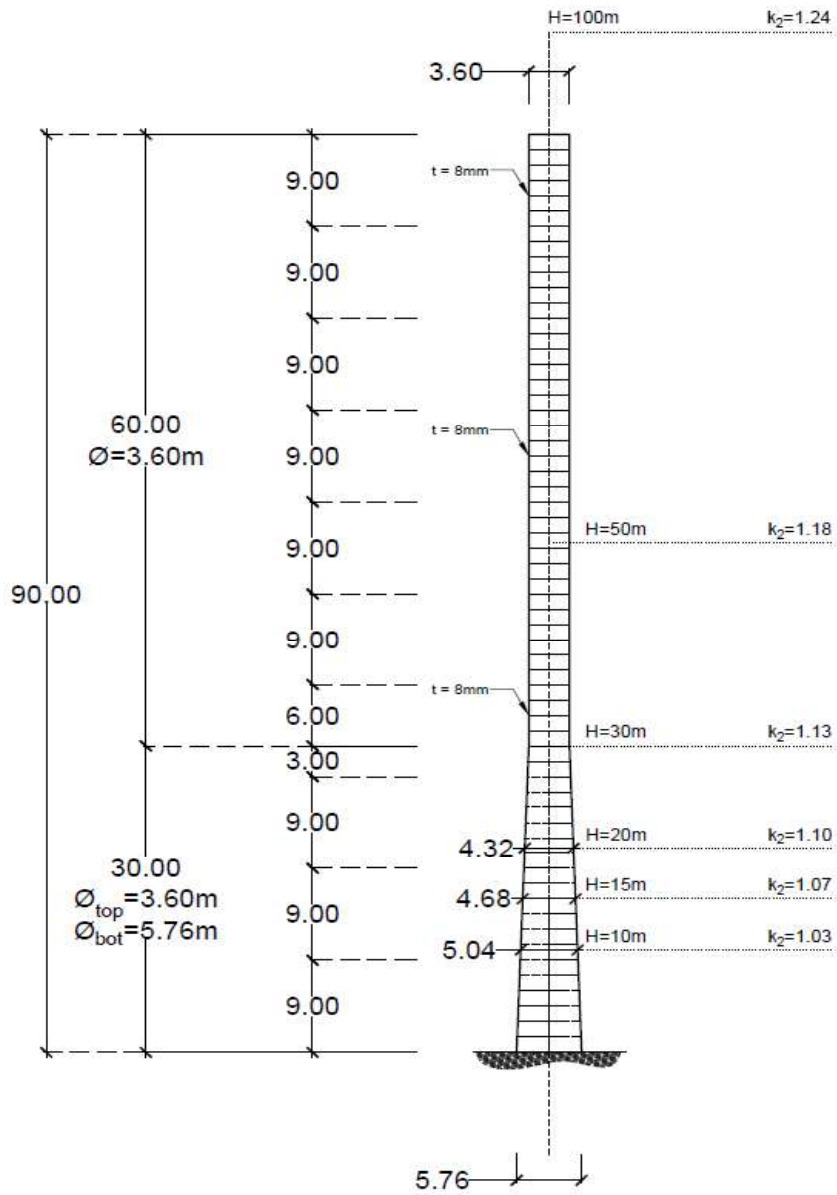
3.10. Propuesta de dimensiones y espesores

Se realiza con las dimensiones mínimas a cumplir según los criterios de normativas y predimensionamientos anteriormente presentados, se tomará en

cuenta para los análisis un espesor útil de la chimenea sin tener en cuenta el espesor adicional tanto interno como externo que serán previstos para la corrosión, pues con el paso del tiempo al dejar ser dañadas estas dos capas debidos a temas corrosivos, la sección útil del espesor será la parte interna que contará con las propiedades del acero analizado; posteriormente para definición de espesores finales se añadirán los espesores respectivos según temas constructivos y criterios ingenieriles.

Se procede a chequear las dimensiones para cumplir con los requerimientos estructurales y de servicio, con las siguientes características de la chimenea:

Figura 8. Elevación de la chimenea, con diámetros y espesores predimensionados presentando factores de viento



Fuente: elaboración propia, utilizando SAP 2000 de CSI.

4. RESULTADOS Y COMPARACIÓN DE MODELOS

4.1. Análisis de proyecto

En el análisis de proyecto se procede a realizar un análisis de las cargas aplicadas y los esfuerzos permisibles comparando las siguientes fuerzas actuantes y sus respectivas comparativas según normativa. En diferentes tramos de 15 metros pues es la forma en la que constructivamente se realizarán los anillos de la chimenea.

4.1.1. Cargas laterales debidas a viento

Con las dimensiones propuestas de diámetros y espesores propuestos en el capítulo anterior, se calcula la carga lateral por parte de la fuerza de viento, para lo cual se integran los diferentes criterios a diferentes alturas, tomando en consideración las características topográficas, de suelos, altura actuante, entre otros.

4.1.2. Cargas debidas a peso propio

En el momento de que la chimenea deja de actuar en su forma completamente vertical, se genera una flexión debida a la excentricidad del propio peso de la estructura en el nivel de análisis.

4.1.3. Cargas debidas a accesorios en la superficie de la chimenea

Todos los accesorios diseñados para efectos de viento, gradas para paso peatonal, escaleras, ductos, entre otros

4.2. Análisis de modelo: en 75 a 90 metros de alturas

Los valores para analizar en las cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 75 a 90 metros de altura son:

$$P_1 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A) * (k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} dh$$

Determinación mediante integral de la carga lateral debida a viento, en función del rango de la altura. (Sahoo, 2012).

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 75 \text{ m}$$

$$H_t = 90 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3 = 1$$

$$A = 50$$

$$B = 100$$

$$k_{2_{50}} = 1.18$$

$$k_{2_{100}} = 1.24$$

$$V_b = 33.33 \frac{m}{s}$$

$$d_{top} = 3.60 \text{ m}$$

$$P_1 = \int_{75}^{90} 0.6 \left[1 * \left[1.18 + \frac{(h-50) * (1.24 - 1.18)}{(100-50)} \right] 1 * 33.33 \frac{m}{s} \right]^2 * \frac{N}{m^2} * 3.6 \text{ m dh}$$

$$P_1 = \int_{75}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 dh$$

$$P_1 = 53,486.79 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 75 m a 90 m).

$$M_1 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A) * (k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

Ecuación 6. Determinación mediante integral del momento debida al viento, en función del rango de la altura

$$M_1 = 403,125.55 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros (Sahoo, 2012).

$$Z_1 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top A}}{4}$$

Módulo de sección con diámetros diferentes

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$T_{top A} = 8 \text{ mm}$$

$$Z_1 = 0.08143 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 75 metros

$$f_{mo1} = \frac{1.05M_1}{Z_1}$$

$$f_{mo1} = 5.198 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{top} = 8\text{mm}$$

$$(\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} (H_t - H_i) = 106.54\text{kN}$$

$$(H_t - H_i) = 15\text{m}$$

$$\pi * d_{top} * T_{top} = 0.09048 \text{ m}^2$$

$$f_{st1} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} dh}{(\pi * d_{top} * T_{top} A)}$$

$$f_{st1} = 1.1775 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl1} = 0.20 * f_{st1} = 0.2355 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t1} = f_{mo1} + f_{st1} + f_{pl1} = 6.611 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$:

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 15 \text{ m}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 4.17$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top}=8\text{mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}}=450$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533 donde los esfuerzos máximos permisibles según investigaciones realizadas, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y diámetro / espesor se muestran en la tabla II, con la cual se establece que el esfuerzo máximo permisible según las características del proyecto sería de 64 MPa. para la altura de análisis.

El esfuerzo actuante de 6.61 MPa, con lo cual se cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente.

$$f_{sh1} = \frac{1.05P_1}{\pi * t_{top} * Top_A} = 0.62088 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante.

4.3. Análisis de modelo: en 60 a 75 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 60 a 75 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i=60 \text{ m}$$

$$H_t=75 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=50$$

$$B=100$$

$$k_{250}=1.18$$

$$k_{2100}=1.24$$

$$V_b=33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}}=3.60 \text{ m}$$

$$P_{2a} = \int_{60}^{75} 0.6 \left[1 * \left[1.18 + \frac{(h-50) * (1.24 - 1.18)}{(100-50)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m } dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada (a) y de altura acumulada (b)

$$P_{2a} = \int_{60}^{75} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 dh$$

$$P_{2a} = 51,918.76 \text{ N}$$

$$P_{2b} = \int_{60}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 dh$$

$$P_{2b} = 105,432.98 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 60 a 75m)

$$M_2 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)*(k_{2B}-k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_2 = 1,596,763.6 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_2 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top B}}{4}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$T_{top B} = 8 \text{ mm}$$

$$Z_2 = 0.0814 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 75 metros

$$f_{mo2} = \frac{1.05 M_2}{Z_2}$$

$$f_{mo2} = 20.597 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{top} = 8 \text{ mm}$$

$$(\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} (H_t - H_i) = 213.89 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 30 \text{ m}$$

$$\pi * d_{top} * T_{top} = 0.09048 \text{ m}^2$$

$$f_{st2} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi \cdot d_{top} \cdot T_{top}) \cdot \rho \cdot g \cdot dh}{(\pi \cdot d_{top} \cdot T_{top} \cdot A)}$$

$$f_{st2} = 2.355 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl2} = 0.20 \cdot f_{st2} = 0.471 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t2} = f_{mo2} + f_{st2} + f_{pl2} = 23.423 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$:

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 30 \text{ m}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 8.33$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top} = 8 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}} = 450$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y diámetro / espesor en la tabla 2 establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 64 MPa.

El esfuerzo actuante es 23.423 MPa y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente.

$$f_{sh2} = \frac{1.05P_2}{\pi * t_{top} * Top_A} = 1.224 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40% del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.4. Análisis de modelo: en 45 a 60 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 45 a 60 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 45 \text{ m}$$

$$H_t = 60 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3 = 1$$

$$A = 30$$

$$B = 50$$

$$k_{230}=1.13$$

$$k_{250}=1.18$$

$$V_b=33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}}=3.60 \text{ m}$$

$$P_{3a} = \int_{50}^{60} 0.6 \left[1 * \left[1.18 + \frac{(h-50)*(1.24-1.18)}{(100-50)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m} \text{ dh}$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada (a) y de altura acumulada (b)

$$P_{3a} = \int_{50}^{60} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 \text{ dh}$$

$$P_{3a} = 33,752.90 \text{ N}$$

Al momento de cambiar el factor k2 por la reducción de altura, se ajusta la integral con este valor:

$$P_{3b} = \int_{45}^{50} 0.6 \left[1 * \left[1.13 + \frac{(h-30)*(1.18-1.13)}{(50-30)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m} \text{ dh}$$

$$P_{3b} = \int_{45}^{50} 2.16 [37.6633 + 0.083[h-30]]^2 \text{ dh}$$

$$P_{3b} = 16,524.65 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_3 = P_{3a} + P_{3b} + P_2 = 33,752.90\text{N} + 16,524.65\text{N} + 105,432.98\text{N} = 155,710.53\text{N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 45 a 60 m)

$$M_3 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)*(k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_{3a} = \int_{50}^{60} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 * (h-45) dh$$

$$M_{3a} = 338,098.23 \text{ N*m}$$

$$M_{3b} = \int_{45}^{50} 2.16 [37.6633 + 0.083[h-30]]^2 * (h-45) dh$$

$$M_{3b} = 41,457.72 \text{ N*m}$$

De igual forma se acumula con el momento generado con su nivel superior:

$$M_{3c} = \int_{45}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 * (h-45) dh = 3,557,568.62$$

$$M_3 = M_{3a} + M_{3b} + M_{3c}$$

$$M_3 = 3,937,124.57 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_3 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top B}}{4}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$T_{top B} = 8 \text{ mm}$$

$$Z_3 = 0.081430 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 60 metros

$$f_{m03} = \frac{1.05 M_3}{Z_3}$$

$$f_{m03} = 50.76 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{\text{top}} = 8 \text{ mm}$$

$$(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} (H_t - H_i) = 639.23 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 45 \text{ m}$$

$$\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} = 0.09048 \text{ m}^2$$

$$f_{\text{st3}} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} \, dh}{(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} A)}$$

$$f_{\text{st3}} = 3532.5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 3.53 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{\text{pl3}} = 0.20 * f_{\text{st3}} = 0.706 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t3} = f_{\text{mo3}} + f_{\text{st3}} + f_{\text{pl3}} = 54.996 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}} < 20$:

$$H_{\text{nivel}} = H_{\text{total}} - H_i = 45 \text{ m}$$

$$d_{\text{top}} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}} = 12.50$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top}=8\text{mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}}=450$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla 2 establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 64 MPa.

El esfuerzo actuante de 54.996 MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 3.54 y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente en la sección 3.3.19.2

$$f_{sh3} = \frac{1.05P_3}{\pi * t_{top} * T_{opA}} = 1.807 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.5. Análisis de modelo: en 30 a 45 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 30 a 45 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 30 \text{ m}$$

$$H_t = 45 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3=1$$

$$A=30$$

$$B=50$$

$$k_{2_{30}}=1.13$$

$$k_{2_{50}}=1.18$$

$$V_b=33.33 \frac{m}{s}$$

$$d_{top}=3.60 \text{ m}$$

$$P_4 = \int_{30}^{45} 0.6 \left[1 * \left[1.13 + \frac{(h-30)*(1.18-1.13)}{(50-30)} \right] 1 * 33.33 \frac{m}{s} \right]^2 * \frac{N}{m^2} * 3.6 \text{ m} dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada

$$P_4 = \int_{30}^{45} 2.16 [37.66 + 0.083[h-30]]^2 dh$$

$$P_4 = 47,488.0 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_{4 \text{ h}=30} = P_4 + P_3 = 155,710.53 \text{ N} + 47,488.0 \text{ N} = 203,198.53 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 30 a 45 m)

$$M_4 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2_A} + \frac{(h-A)*(k_{2_B}-k_{2_A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_{4a} = \int_{30}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 * (h-30) dh$$

$$M_{3a} = 368,282.27 \text{ N*m}$$

$$M_{4b} = \int_{30}^{90} 2.16 [37.6633 + 0.083[h-30]]^2 (h-30) dh$$

$$M_{4b} = 6,262,545.07 \text{ N}\cdot\text{m}$$

De igual forma se acumula con el momento generado con su nivel superior:

$$M_4 = M_{4a} + M_{4b}$$

$$M_4 = 6,630,827.341 \text{ N}\cdot\text{m} = 6.6308 \text{ MPA}$$

Módulo de sección

$$Z_4 = \frac{\pi \cdot d_{\text{top}}^2 \cdot T_{\text{top}}}{4}$$

$$d_{\text{top}} = 3.6 \text{ m}$$

$$T_{\text{top B}} = 12 \text{ mm}$$

$$Z_4 = 0.122145 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 30 metros

$$f_{\text{mo4}} = \frac{1.05 M_4}{Z_4}$$

$$f_{\text{mo4}} = 57.00 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{\text{top}} = 12 \text{ mm}$$

$$(\pi \cdot d_{\text{top}} \cdot T_{\text{top}}) \cdot \text{den} \cdot (H_t - H_i) = 639.23 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 60 \text{ m}$$

$$\pi \cdot d_{\text{top}} \cdot T_{\text{top}} = 0.1357 \text{ m}^2$$

$$f_{st4} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{top} * T_{top}) * \rho * g * dh}{(\pi * d_{top} * T_{top} * A)}$$

$$f_{st4} = 4.710 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl4} = 0.20 * f_{st4} = 0.942 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t4} = f_{mo4} + f_{st4} + f_{pl4} = 48.15 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$:

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 60 \text{ m}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 16.33$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top} = 12 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}} = 300$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla 2 establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 87 MPa.

El esfuerzo actuante de 48.152 MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 2.18 y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente en la sección 3.3.19.2

$$f_{sh4} = \frac{1.05P_4}{\pi * t_{top} * Top_A} = 1,179,064.34 \frac{N}{m^2} \approx 1.18 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40% del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.6. Análisis de modelo: en 15 a 30 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 15 a 30 metros de altura.

Se divide el cálculo de las presiones debido a la diferencia de valores en los coeficientes por la altura donde se ubica la sección de análisis.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 20 \text{ m}$$

$$H_t = 30 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=30$$

$$B=50$$

$$k_{2_{15}}=1.07$$

$$k_{2_{30}}=1.13$$

$$V_b=33.33 \frac{m}{s}$$

$$d_{top}=3.60 \text{ m}$$

$$d_{base}=4.32 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m=d_{base}-\left(h \frac{(d_{base}-d_{top})}{h_{total}}\right)=4.68-\left(h \frac{(4.32-3.6)}{10}\right)$$

$$m=4.68-0.072h$$

$$P_{5a}=\int_{20}^{30} 0.6 \left[1 * \left[1.10 + \frac{(h-20)*(1.13-1.10)}{(30-20)} \right] 1 * 33.33 \frac{m}{s} \right]^2 (d_{base}-0.072h) dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada

$$P_{5a}=\int_{20}^{30} 0.6 (36.663+0.1(h-20))^2*(4.68-0.072h)dh$$

$$P_{5a}=23,839.89N$$

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i=15 \text{ m}$$

$$H_t=20 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=15$$

$$B=20$$

$$k_{215}=1.07$$

$$k_{220}=1.10$$

$$V_b=33.33 \frac{m}{s}$$

$$d_{top}=4.32 \text{ m}$$

$$d_{base}=4.68 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m=d_{base}-\left(h \frac{(d_{base}-d_{top})}{h_{total}}\right)=4.68-\left(h \frac{(4.68-4.32)}{5}\right)$$

$$m=4.68-0.072h$$

$$P_{5b}=\int_{15}^{20} 0.6 \left[1 * \left[1.07 + \frac{(h-15)*(1.10-1.07)}{(20-15)} \right] 1 * 33.33 \frac{m}{s} \right]^2 (d_{base}-0.072h) dh$$

$$P_{5b}=\int_{15}^{20} 0.6 (35.663+0.199(h-15))^2 * (4.68-0.072h) dh$$

$$P_{5a}=13,410.16 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_{5 \text{ h}=15}=P_{5a} + P_{5b} + P_4=23,839.89\text{N}+13,410.16\text{N}+203,198.53\text{N}$$

$$P_{5 \text{ h}=15}=240,448.58 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 15 a 30m)

$$M_5 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)*(k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_{5a} = \int_{20}^{30} 0.6 (35.663 + 0.10(h-20))^2 * (4.68 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{3a} = 56,512.28 \text{ N*m}$$

$$M_{5b} = \int_{15}^{20} 0.6 (35.663 + 0.199(h-15))^2 * (4.68 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{5b} = 59,762.65 \text{ N*m}$$

$$M_{5c} = \int_{15}^{90} 2.81 (35.663 + 0.07(h-15))^2 * (h-15) * h dh$$

$$M_{5c} = 12,133,445.09 \text{ N*m}$$

De igual forma se acumula con el momento generado con su nivel superior:

$$M_5 = M_{5a} + M_{5b} + M_{5c}$$

$$M_5 = 12,249,720.02 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_5 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top}}{4}$$

$$d_{top} = 4.68 \text{ m}$$

$$T_{top} = 16 \text{ mm}$$

$$Z_5 = 0.2752 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 30 metros

$$f_{mo5} = \frac{1.05M_5}{Z_5}$$

$$f_{mo5} = 46,737,667 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 46.74 \text{ Mpa} \approx 476.21 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{\text{top}} = 16 \text{ mm}$$

$$(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} * (H_t - H_i) = 639.23 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 75 \text{ m}$$

$$\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} = 0.1809 \text{ m}^2$$

$$f_{st5} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} \, dh}{(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} A)}$$

$$f_{st5} = 5,887.5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 5.89 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl5} = 0.20 * f_{st5} = 1.18 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t5} = f_{mo5} + f_{st5} + f_{pl5} = 53.81 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}} < 20$:

$$H_{\text{nivel}} = H_{\text{total}} - H_i = 75 \text{ m}$$

$$d_{\text{top}} = 4.68 \text{ m}$$

$$\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}} = 16.03$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{\text{top}} = 16 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{\text{top}}}{T_{\text{top}}} = 292.5$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 87 MPa.

El esfuerzo actuante de 53.81 MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 1.62 y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente en la sección 3.3.19.2

$$f_{sh5} = \frac{1.05P_5}{\pi * t_{top} * Top_A} = 1,073,237.422 \frac{N}{m^2} \approx 1.07 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.7. Análisis de modelo: en 0 a 15 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 0 a 15 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 10 \text{ m}$$

$$H_t = 15 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3 = 1$$

$$A = 30$$

$$B = 50$$

$$k_{2_{15}} = 1.07$$

$$k_{2_{10}} = 1.03$$

$$V_b = 33.33 \frac{m}{s}$$

$$d_{top} = 4.68 \text{ m}$$

$$d_{base \ h=10m} = 5.04 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m = d_{\text{base}} - \left(h \frac{(d_{\text{base}} - d_{\text{top}})}{h_{\text{total}}} \right) = 5.04 - \left(h \frac{(5.04 - 4.68)}{10} \right)$$

$$m = 5.04 - 0.072h$$

$$P_{6a} = \int_{10}^{15} 0.6 \left[1 * \left[1.03 + \frac{(h-10)*(1.07-1.03)}{(15-10)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 (5.04 - 0.072h) dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada

$$P_{6a} = \int_{10}^{15} 0.6 (34.3299 + 0.266(h-10))^2 * (5.04 - 0.072h) dh$$

$$P_{6a} = 15,203.52 \text{ N}$$

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 0 \text{ m}$$

$$H_t = 10 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3 = 1$$

$$A = 15$$

$$B = 20$$

$$k_{2_{15}} = 1.07$$

$$k_{2_{10}} = 1.03$$

$$V_b = 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}} = 5.04 \text{ m}$$

$$d_{\text{base}} = 5.76 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m = d_{\text{base}} - \left(h \frac{(d_{\text{base}} - d_{\text{top}})}{h_{\text{total}}} \right) = 5.76 - \left(h \frac{(5.04 - 4.68)}{5} \right)$$

$$m = 5.76 - 0.072h$$

$$P_{6b} = \int_0^{10} 0.6 \left[1 * [1.03] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 (d_{\text{base}} - 0.072h) dh$$

$$P_{6b} = 38,184.76 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_6 = P_{6a} + P_{6b} + P_5 = 15,203.52 \text{ N} + 38,184.76 \text{ N} + 240,448.58 \text{ N} = 293,836.86 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado

$$M_6 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A) * (k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * d_{\text{top}} (h - H_i) dh$$

$$M_{6a} = \int_0^{10} 0.6 (1(34.33))^2 * \left(5.76 - h \frac{5.76 - 5.04}{10} \right) * h dh$$

$$M_{6a} = 186,682.32 \text{ N*m}$$

$$M_{6b} = \int_{10}^{15} 0.6 (1(34.33 + 0.266(h-10)))^2 * (5.04 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{6b} = 189,975.59 \text{ N*m}$$

$$M_{6c} = \int_{15}^{20} 0.6 (34.33 + 0.266(h-10))^2 * (5.04 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{6c} = 189,975.59 \text{ N*m}$$

$$M_{6d} = \int_{20}^{30} 0.6 \left[1 * \left[36.663 + (h-20) \frac{(1.13-1.10)}{(30-20)} \right] \right]^2 (4.32-0.072h) dh$$

$$M_{6d} = 517,235.64 \text{ N*m}$$

$$M_{6e} = \int_0^{90} 0.6 (1.24 * 33.33)^2 * 3.6 * h \, dh$$

$$M_{6e} = 14,942,275 \text{ N*m}$$

$$M_6 = 16,070,596 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_6 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top}}{4}$$

$$d_{top} = 5.76 \text{ m}$$

$$T_{top} = 16 \text{ mm}$$

$$Z_6 = 0.4169 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 60 metros

$$f_{mo6} = \frac{1.05 M_6}{Z_6}$$

$$f_{mo6} = 40.743 \text{ Mpa} \approx 412.42 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{top} = 16 \text{ mm}$$

$$(\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} * (H_t - H_i) = 2,045.5236 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 90 \text{ m}$$

$$\pi * d_{top} * T_{top} = 0.289529 \text{ m}^2$$

$$f_{st6} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{top} * T_{top}) * \rho * g * dh}{(\pi * d_{top} * T_{top} * A)}$$

$$f_{st6} = 7.065 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl6} = 0.20 * f_{st6} = 1.413 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t6} = f_{m06} + f_{st6} + f_{pl6} = 48.951 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 90 \text{ m}$$

$$d_{top} = 5.76 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 15.625$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top} = 16 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}} = 360$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla II se

establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 78 MPa.

El esfuerzo actuante de 48.95 MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 1.59 y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente en la sección 3.3.19.2

$$f_{sh6} = \frac{1.05P_6}{\pi * t_{top} * Top_A} = 1.019 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40% del valor nominal de Fy:

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.8. Resumen de cálculos

A continuación, se presenta la tabla IX en donde se detalla el resumen de secciones analizadas.

Tabla IX. **Resumen de secciones analizadas con espesor, esfuerzo a tensión actuante y ratio demanda/capacidad**

Tramo de altura analizada		D diámetro	E espesor	M Módulo de sección	C Cargas por servicio	M Momento debido a viento	M Máximo esfuerzo a tensión	C Capacidad permisible a tensión	Ra Ratio
e (m)	asta (m)	H top (m)	m	Z (m ³)	N	K N*m	M Pa	M Pa	De manda/Ca pacidad
5	0	9	3	8	0	5	4	6	10
		.6		.1629	3.49	03.13	.60905	4	.33%
0	5	7	3	8	0	1	1	2	36
		.6		.1629	05.43	.596.76	3.423	4	.60%

Continuación tabla IX.

5	0	6	3	8	0	1	3	5	6	85
		.6			.1629	55.71	,937.12	4.996	4	.93%
0	5	4	3	1	0	2	6	6	8	72
		.6		2	.1629	03.20	,592.13	2.652	7	.01%
5	0	3	4	1	0	2	1	5	8	61
		.68		6	.2752	40.45	2,249.72	3.81	7	.85%
	5	1	5	1	0	2	1	4	7	62
		.76		6	.4169	93.84	6,070.60	8.95	8	.76%

Fuente: elaboración propia.

Debe mencionarse que los espesores anteriormente expuestos y calculados son los mínimos para cumplir las demandas solicitadas a estos se les añadirá el espesor adicional debido a corrosión interna y externa mencionados en la sección 3.3.15 y 3.3.16 donde al espesor requerido debido a esfuerzos por tensión, se añadirá 3mm para corrosión exterior y 5 mm para corrosión interior. Para lo cual se realiza el chequeo de los nuevos espesores.

4.9. Análisis de modelo: en 75 a 90 metros de alturas

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 75 a 90 metros de altura.

Valores para analizar:

$$P_1 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A) * (k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} dh$$

Determinación mediante integral de la carga lateral debida a viento, en función del rango de la altura

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 75 \text{ m}$$

$$H_t = 90 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=50$$

$$B=100$$

$$k_{250}=1.18$$

$$k_{2100}=1.24$$

$$V_b=33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}}=3.60 \text{ m}$$

$$P_1 = \int_{75}^{90} 0.6 \left[1 * \left[1.18 + \frac{(h-50) * (1.24 - 1.18)}{(100-50)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m} dh$$

$$P_1 = \int_{75}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 dh$$

$$P_1 = 53,486.79 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 75m a 90 m):

$$M_1 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A) * (k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * d_{\text{top}} (h-H_i) dh$$

Determinación mediante integral del momento debida al viento, en función del rango de la altura.

$$M_1 = 403,125.55 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_1 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top A}}{4}$$

Módulo de sección con diámetros diferentes.

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$T_{top A} = 16 \text{ mm}$$

$$Z_1 = 0.16286 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 75 metros

$$f_{mo1} = \frac{1.05M_1}{Z_1}$$

$$f_{mo1} = 2.599 \text{ Mpa} \approx 26.503 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{top} = 16 \text{ mm}$$

$$(\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} (H_t - H_i) = 213.89 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 15 \text{ m}$$

$$\pi * d_{top} * T_{top} = 0.18095 \text{ m}^2$$

$$f_{st1} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} dh}{(\pi * d_{top} * T_{top A})}$$

$$f_{st1} = 1,177.50 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 1.1775 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl1} = 0.20 * f_{st1} = 0.2355 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t1} = f_{mo1} + f_{st1} + f_{pl1} = 4.012 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 15 \text{ m}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 4.17$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top} = 16 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}} = 225$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533.

Esfuerzos máximos permisibles según investigaciones realizadas, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor; según la tabla II, se establece que el esfuerzo máximo permisible según las características del proyecto sería de 105 MPa. para la altura de análisis.

El esfuerzo actuante de 4.012 MPa, con lo cual se cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente en la sección 3.3.19.2

$$f_{sh1} = \frac{1.05P_1}{\pi * t_{top} * Top_A} = 310,357.655 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 0.31 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante

4.10. Análisis de modelo: en 60 a 75 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 60 a 75 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 60 \text{ m}$$

$$H_t = 75 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3 = 1$$

$$A = 50$$

$$B = 100$$

$$k_{250} = 1.18$$

$$k_{2100} = 1.24$$

$$V_b = 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}} = 3.60 \text{ m}$$

$$P_{2a} = \int_{60}^{75} 0.6 \left[1 * \left[1.18 + \frac{(h-50) * (1.24 - 1.18)}{(100 - 50)} \right] * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m } dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada (a) y de altura acumulada (b)

$$P_{2a} = \int_{60}^{75} 2.16 [39.33 + 0.04[h - 50]]^2 dh$$

$$P_{2a} = 51,918.76 \text{ N}$$

$$P_{2b} = \int_{60}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 dh$$

$$P_{2b} = 105,432.98 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 60 a 75m)

$$M_2 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)(k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_2 = 1,596,763.6 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_2 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top B}}{4}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$T_{top B} = 16 \text{ mm}$$

$$Z_2 = 0.16286 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 75 metros

$$f_{mo2} = \frac{1.05M_2}{Z_2}$$

$$f_{mo2} = 10.29 \text{ Mpa} \approx 104.93 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{\text{top}} = 16 \text{ mm}$$

$$(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} (H_t - H_i) = 213.89 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 30 \text{ m}$$

$$\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} = 0.18095 \text{ m}^2$$

$$f_{\text{st}2} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} \, dh}{(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} A)}$$

$$f_{\text{st}1} = 1,177.50 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 1.1775 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{\text{pl}2} = 0.20 * f_{\text{st}2} = 0.2355 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t2} = f_{\text{mo}2} + f_{\text{st}2} + f_{\text{pl}2} = 11.703 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}} < 20$:

$$H_{\text{nivel}} = H_{\text{total}} - H_i = 30 \text{ m}$$

$$d_{\text{top}} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}} = 8.33$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top}=16\text{mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}}=225$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla II se establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 105 MPa.

El esfuerzo actuante es 11.703 MPa y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente.

$$f_{sh2}=\frac{1.05P_2}{\pi * t_{top} * T_{opA}}=611,777.39 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 0.61 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}}= 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.11. Análisis de modelo: en 45 a 60 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 45 a 60 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i=45 \text{ m}$$

$$H_t=60 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=30$$

$$B=50$$

$$k_{230}=1.13$$

$$k_{250}=1.18$$

$$V_b=33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}}=3.60 \text{ m}$$

$$P_{3a} = \int_{50}^{60} 0.6 \left[1 * \left[1.18 + \frac{(h-50)*(1.24-1.18)}{(100-50)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m} \text{ dh}$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada (a) y de altura acumulada (b)

$$P_{3a} = \int_{50}^{60} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 \text{ dh}$$

$$P_{3a} = 33,752.90 \text{ N}$$

Al momento de cambiar el factor k2 por la reducción de altura, se ajusta la integral con este valor:

$$P_{3b} = \int_{45}^{50} 0.6 \left[1 * \left[1.13 + \frac{(h-30)*(1.18-1.13)}{(50-30)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m} \text{ dh}$$

$$P_{3b} = \int_{45}^{50} 2.16 [37.6633 + 0.083[h-30]]^2 \text{ dh}$$

$$P_{3b} = 16,524.65 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_3 = P_{3a} + P_{3b} + P_2 = 33,752.90\text{N} + 16,524.65\text{N} + 105,432.98\text{N} = 155,710.53\text{N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 45 a 60m)

$$M_3 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)*(k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_{3a} = \int_{50}^{60} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 * (h-45) dh$$

$$M_{3a} = 338,098.23 \text{ N*m}$$

$$M_{3b} = \int_{45}^{50} 2.16 [37.6633 + 0.083[h-30]]^2 * (h-45) dh$$

$$M_{3b} = 41,457.72 \text{ N*m}$$

De igual forma se acumula con el momento generado con su nivel superior:

$$M_{3c} = \int_{45}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 * (h-45) dh = 3,557,568.62$$

$$M_3 = M_{3a} + M_{3b} + M_{3c}$$

$$M_3 = 3,937,124.57 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_3 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top B}}{4}$$

$$d_{\text{top}}=3.6 \text{ m}$$

$$T_{\text{top B}}=16 \text{ mm}$$

$$Z_3= 0.16286 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 60 metros

$$f_{\text{mo3}}=\frac{1.05M_3}{Z_3}$$

$$f_{\text{mo3}}=25383647.32 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 25.38 \text{ Mpa} \approx 258.84 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den}=78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{\text{top}}=16\text{mm}$$

$$(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} (H_t - H_i) = 639.23 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 45\text{m}$$

$$\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} = 0.1809 \text{ m}^2$$

$$f_{\text{st3}} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} \, dh}{(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top A}})}$$

$$f_{\text{st3}} = 3532.5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 3.53 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{\text{pl3}} = 0.20 * f_{\text{st3}} = 0.706 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{\text{t3}} = f_{\text{mo3}} + f_{\text{st3}} + f_{\text{pl3}} = 29.62 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$:

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 45 \text{ m}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 12.50$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top} = 16 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}} = 225$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla II se establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 105 MPa.

El esfuerzo actuante de 29.62 MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 3.54 y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente.

$$f_{sh3} = \frac{1.05P_3}{\pi * t_{top} * T_{topA}} = 903,514.08 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 0.9035 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.12. Análisis de modelo: en 30 a 45 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 30 a 45 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 30 \text{ m}$$

$$H_t = 45 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3 = 1$$

$$A = 30$$

$$B = 50$$

$$k_{2_{30}} = 1.13$$

$$k_{2_{50}} = 1.18$$

$$V_b = 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}} = 3.60 \text{ m}$$

$$P_4 = \int_{30}^{45} 0.6 \left[1 * \left[1.13 + \frac{(h-30) * (1.18-1.13)}{(50-30)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 * \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 3.6 \text{ m } dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada

$$P_4 = \int_{30}^{45} 2.16 [37.66 + 0.083[h-30]]^2 dh$$

$$P_4 = 47,488.0 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_{4\ h=30}=P_4 +P_3=155,710.53\ \text{N}+47,488.0\ \text{N}=203,198.53\ \text{N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 30 a 45 m)

$$M_4 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)*(k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_{4a} = \int_{30}^{90} 2.16 [39.33 + 0.04[h-50]]^2 * (h-30) dh$$

$$M_{3a} = 329,584.46\ \text{N*m}$$

$$M_{4b} = \int_{30}^{90} 2.16 [37.6633 + 0.083[h-30]]^2 * (h-30) dh$$

$$M_{4b} = 6,262,545.07\ \text{N*m}$$

De igual forma se acumula con el momento generado con su nivel superior:

$$M_4 = M_{4a} + M_{4b}$$

$$M_4 = 6,592,129.53\ \text{N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_4 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top}}{4}$$

$$d_{top} = 3.6\ \text{m}$$

$$T_{top\ B} = 20\ \text{mm}$$

$$Z_4 = 0.20358\ \text{m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 30 metros

$$f_{mo4} = \frac{1.05M_4}{Z_4}$$

$$f_{mo4} = 32.30 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{top} = 20 \text{ mm}$$

$$(\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} * (H_t - H_i) = 639.23 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 60 \text{ m}$$

$$\pi * d_{top} * T_{top} = 0.1809 \text{ m}^2$$

$$f_{st4} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{top} * T_{top}) * \text{den} \, dh}{(\pi * d_{top} * T_{top} * A)}$$

$$f_{st4} = 4,710 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 4.71 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl4} = 0.20 * f_{st4} = 0.942 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t4} = f_{mo4} + f_{st4} + f_{pl4} = 37.95 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado.

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 60 \text{ m}$$

$$d_{top} = 3.6 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 16.33$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top}=20\text{mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}}=180$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla II se establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 118 MPa.

El esfuerzo actuante de 37.95 MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 2.18 y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente.

$$f_{sh4} = \frac{1.05P_4}{\pi * t_{top} * T_{opA}} = 943,251.47 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 0.943\text{MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40% del valor nominal de Fy:

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50\text{MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.13. Análisis de modelo: en 15 a 30 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 15 a 30 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i=20 \text{ m}$$

$$H_t=30 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=30$$

$$B=50$$

$$k_{2_{15}}=1.07$$

$$k_{2_{30}}=1.13$$

$$V_b=33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}}=3.60 \text{ m}$$

$$d_{\text{base}}=4.32 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m=d_{\text{base}}-\left(h \frac{(d_{\text{base}}-d_{\text{top}})}{h_{\text{total}}}\right)=4.68-\left(h \frac{(4.32-3.6)}{10}\right)$$

$$m=4.68-0.072h$$

$$P_{5a}=\int_{20}^{30} 0.6 \left[1 * \left[1.10 + \frac{(h-20)*(1.13-1.10)}{(30-20)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 (d_{\text{base}}-0.072h) dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada

$$P_{5a}=\int_{20}^{30} 0.6 (36.663+0.1(h-20))^2*(4.68-0.072h)dh$$

$$P_{5a}=23,839.89\text{N}$$

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i=15 \text{ m}$$

$$H_t=20 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=15$$

$$B=20$$

$$k_{2_{15}}=1.07$$

$$k_{2_{20}}=1.10$$

$$V_b=33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}}=4.32 \text{ m}$$

$$d_{\text{base}}=4.68 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m=d_{\text{base}}-\left(h \frac{(d_{\text{base}}-d_{\text{top}})}{h_{\text{total}}}\right)=4.68-\left(h \frac{(4.68-4.32)}{5}\right)$$

$$m=4.68-0.072h$$

$$P_{5b}=\int_{15}^{20} 0.6 \left[1 * \left[1.07 + \frac{(h-15)*(1.10-1.07)}{(20-15)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 (d_{\text{base}}-0.072h) dh$$

$$P_{5b}=\int_{15}^{20} 0.6 (35.663+0.199(h-15))^2*(4.68-0.072h) dh$$

$$P_{5a}=13,410.16 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_{5 \text{ h}=15}=P_{5a}+P_{5b}+P_4=23,839.89\text{N}+13,410.16\text{N}+203,198.53\text{N}$$

$$P_{5 \text{ h}=15}=240,448.58 \text{ N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado (de 15 a 30m):

$$M_5 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)*(k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_{5a} = \int_{20}^{30} 0.6 (35.663 + 0.10(h-20))^2 * (4.68 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{3a} = 56,512.28 \text{ N*m}$$

$$M_{5b} = \int_{15}^{20} 0.6 (35.663 + 0.199(h-15))^2 * (4.68 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{5b} = 59,762.65 \text{ N*m}$$

$$M_{5c} = \int_{15}^{90} 2.81 (35.663 + 0.07(h-15))^2 * (h-15) * h dh$$

$$M_{5c} = 12,133,445.09 \text{ N*m}$$

De igual forma se acumula con el momento generado con su nivel superior:

$$M_5 = M_{5a} + M_{5b} + M_{5c}$$

$$M_5 = 12,249,720.02 \text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_5 = \frac{\pi * d_{top}^2 * T_{top}}{4}$$

$$d_{top} = 4.68 \text{ m}$$

$$T_{top} = 25 \text{ mm}$$

$$Z_5 = 0.430 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 30 metros

$$f_{mo5} = \frac{1.05M_5}{Z_5}$$
$$f_{mo5} = 29.9121 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$
$$T_{\text{top}} = 25 \text{ mm}$$
$$(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} * (H_t - H_i) = 639.23 \text{ kN}$$
$$(H_t - H_i) = 75 \text{ m}$$
$$\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}} = 0.1809 \text{ m}^2$$
$$f_{st5} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}}) * \text{den} \, dh}{(\pi * d_{\text{top}} * T_{\text{top}})}$$
$$f_{st5} = 5,887.5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \approx 5.89 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl5} = 0.20 * f_{st5} = 1.1775 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t5} = f_{mo5} + f_{st5} + f_{pl5} = 53.81 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}} < 20$:

$$H_{\text{nivel}}=H_{\text{total}}-H_i=75 \text{ m}$$

$$d_{\text{top}}=4.68 \text{ m}$$

$$\frac{H_{\text{nivel}}}{d_{\text{top}}}=16.03$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{\text{top}}=25\text{mm}$$

$$\frac{d_{\text{top}}}{T_{\text{top}}}=187.2$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla II se establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 115MPa.

El esfuerzo actuante de 36.9775 MPa y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente.

$$f_{\text{sh5}}=\frac{1.05P_5}{\pi * t_{\text{top}} * T_{\text{opA}}}=0.68687 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}}=0.40 * f_y=127.50\text{MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.14. Análisis de modelo: en 0 a 15 metros de altura

Cargas laterales debidas a viento: tramo comprendido entre 0 a 15 metros de altura.

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i=10 \text{ m}$$

$$H_t=15 \text{ m}$$

$$k_1=1$$

$$k_3=1$$

$$A=30$$

$$B=50$$

$$k_{2_{15}}=1.07$$

$$k_{2_{10}}=1.03$$

$$V_b=33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}}=4.68 \text{ m}$$

$$d_{\text{base } h=10\text{m}}=5.04 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m=d_{\text{base}}-\left(h \frac{(d_{\text{base}}-d_{\text{top}})}{h_{\text{total}}}\right)=5.04-\left(h \frac{(5.04-4.68)}{10}\right)$$

$$m=5.04-0.072h$$

$$P_{6a}=\int_{10}^{15} 0.6 \left[1 * \left[1.03 + \frac{(h-10)*(1.07-1.03)}{(15-10)} \right] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 (5.04-0.072h) dh$$

Se calculan los diferentes esfuerzos en la sección de altura analizada

$$P_{6a} = \int_{10}^{15} 0.6 (34.3299 + 0.266(h-10))^2 (5.04 - 0.072h) dh$$

$$P_{6a} = 15,203.52 \text{ N}$$

Ecuación donde se toman los siguientes datos:

$$H_i = 0 \text{ m}$$

$$H_t = 10 \text{ m}$$

$$k_1 = 1$$

$$k_3 = 1$$

$$A = 15$$

$$B = 20$$

$$k_{2,15} = 1.07$$

$$k_{2,10} = 1.03$$

$$V_b = 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d_{\text{top}} = 5.04 \text{ m}$$

$$d_{\text{base}} = 5.76 \text{ m}$$

Relación de diámetro:

$$m = d_{\text{base}} - \left(h \frac{(d_{\text{base}} - d_{\text{top}})}{h_{\text{total}}} \right) = 5.76 - \left(h \frac{(5.04 - 4.68)}{5} \right)$$

$$m = 5.76 - 0.072h$$

$$P_{6b} = \int_0^{10} 0.6 \left[1 * [1.03] 1 * 33.33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 (d_{\text{base}} - 0.072h) dh$$

$$P_{6b} = 38,184.76 \text{ N}$$

Debido a que la presión es acumulativa, se procede a adicionar para determinar su magnitud en el punto:

$$P_6 = P_{6a} + P_{6b} + P_5 = 15,203.52\text{N} + 38,184.76\text{N} + 240,448.58\text{ N}$$

$$P_6 = 293,836.86\text{N}$$

Determinación del momento debido a la fuerza ejercida por el viento: basándose en la carga lateral por el brazo que tiene el centroide del rango analizado:

$$M_6 = \int_{H_i}^{H_t} 0.6 \left[k_1 * \left[k_{2A} + \frac{(h-A)*(k_{2B} - k_{2A})}{(B-A)} \right] k_3 * V_b \left(\frac{m}{s} \right) \right]^2 * \frac{N}{m^2} * d_{top} (h-H_i) dh$$

$$M_{6a} = \int_0^{10} 0.6 (1(34.33))^2 * \left(5.76 - h \frac{5.76-5.04}{10} \right) * h dh$$

$$M_{6a} = 186,682.32\text{ N*m}$$

$$M_{6b} = \int_{10}^{15} 0.6 (1(34.33 + 0.266(h-10)))^2 * (5.04 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{6b} = 189,975.59\text{ N*m}$$

$$M_{6c} = \int_{15}^{20} 0.6 (34.33 + 0.266(h-10))^2 * (5.04 - 0.072h) * h dh$$

$$M_{6c} = 189,975.59\text{ N*m}$$

$$M_{6d} = \int_{20}^{30} 0.6 \left[1 * \left[36.663 + (h-20) \frac{(1.13-1.10)}{(30-20)} \right] \right]^2 (4.32 - 0.072h) dh$$

$$M_{6d} = 517,235.64\text{ N*m}$$

$$M_{6e} = \int_0^{90} 0.6 (1.24 * 33.33)^2 * 3.6 * h dh$$

$$M_{6e} = 14,942,275\text{ N*m}$$

$$M_6 = 16,070,596\text{ N*m}$$

Para el módulo de sección, intervienen las variables geométricas, que en este caso son los diámetros:

$$Z_6 = \frac{\pi \cdot d_{top}^2 \cdot T_{top}}{4}$$

$$d_{top} = 5.76 \text{ m}$$

$$T_{top} = 25 \text{ mm}$$

$$Z_6 = 0.6514 \text{ m}^3$$

Esfuerzo de flexión en la fibra extrema a nivel de 60 metros

$$f_{mo6} = \frac{1.05M_6}{Z_6}$$

$$f_{mo6} = 25.904 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido al propio peso

$$\text{den} = 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \approx 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{top} = 25 \text{ mm}$$

$$(\pi \cdot d_{top} \cdot T_{top}) \cdot \text{den} \cdot (H_t - H_i) = 2,045.5236 \text{ kN}$$

$$(H_t - H_i) = 90 \text{ m}$$

$$\pi \cdot d_{top} \cdot T_{top} = 0.289529 \text{ m}^2$$

$$f_{st6} = \frac{\int_{H_i}^{H_t} (\pi \cdot d_{top} \cdot T_{top}) \cdot \text{den} \cdot dh}{(\pi \cdot d_{top} \cdot T_{top} \cdot A)}$$

$$f_{st6} = 7.065 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión axial debido a accesorios

$$f_{pl6} = 0.20 \cdot f_{st6} = 1.413 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo generado a tensión

$$f_{t6} = f_{mo6} + f_{st6} + f_{pl6} = 34.382 \text{ MPa}$$

Máximo esfuerzo permisible al nivel analizado

La relación entre la altura de análisis y el diámetro analizado en esa parte no debe superar el número 20 según normativa IS:6533 (Part 2) $\frac{H_{nivel}}{d_{top}} < 20$:

$$H_{nivel} = H_{total} - H_i = 90 \text{ m}$$

$$d_{top} = 5.76 \text{ m}$$

$$\frac{H_{nivel}}{d_{top}} = 15.625$$

Debido a que la relación entre la altura en análisis y diámetro es menor a 20, se procede a tomar la indicación de la normativa que es obtener la relación en el diámetro de la chimenea y su espesor:

$$T_{top} = 25 \text{ mm}$$

$$\frac{d_{top}}{T_{top}} = 230.4$$

Con la relación planteada se procede a obtener el esfuerzo máximo permisible para chimeneas circulares según IS:6533, basados en la relación de altura analizada / diámetro de análisis y Diámetro / espesor en la tabla II se establece que el esfuerzo máximo permisible según las características en esta franja de análisis del proyecto sería de 104 MPa.

El esfuerzo actuante de 34.382 MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 1.59 y cumple satisfactoriamente el esfuerzo permisible, se procede a chequear el esfuerzo por cortante y comparar contra su valor permisible definido anteriormente.

$$f_{sh6} = \frac{1.05P_6}{\pi * t_{top} * T_{opA}} = 0.682 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible en corte es de 40 % del valor nominal de F_y :

$$f_{y \text{ corte}} = 0.40 * f_y = 127.50 \text{ MPa}$$

Con lo cual cumple satisfactoriamente en resistencia a cortante satisfactoriamente.

4.15. Resumen de esfuerzos con espesor a utilizar

Según los espesores de los anillos con el recubrimiento adicional por anticorrosión con paso del tiempo de la vida útil de la chimenea, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla X. **Resumen de secciones por utilizar, con espesores reales, esfuerzo a tensión actuante y ratio demanda/capacidad**

Tramo de altura analizada		D	E	M	C	M	M	C	R
		ímetro	spesor	ódulo de sección	argas por servicio	omento debido a viento	áximo esfuerzo o a tensión	apacidad permisible a tensión	atio
e (m)	asta (m)	H _{top} (m)	Ø	m	Z (m ³)	N	K	M	D
			m	m	(m ³)		N*m	Pa	emanda/ Capacidad
5	0	9	3	1	0	5	4	4	3.
		.6	6	1	.1629	3.49	03.13	.102	91 %
0	5	7	3	1	0	1	1,	1	1
		.6	6	1	.1629	05.43	596.76	1.703	1.15%
5	0	6	3	1	0	1	3,	2	2
		.6	6	1	.1629	55.71	937.12	9.62	8.21%
0	5	4	3	2	0	2	6,	3	3
		.6	0	2	.1629	03.20	592.13	7.952	2.16%
5	0	3	4	2	0	2	1	3	3
		.68	5	2	.2752	40.45	2,249.72	6.9775	2.15%
	5	1	5	2	0	2	1	3	3
		.76	5	2	.4169	93.84	6,070.60	4.382	3.06%

Fuente: elaboración propia.

4.16. Diseño de cimentación

Con los espesores anteriormente definidos, se calcula el peso de la estructura junto con criterios ingenieriles para el diseño de la cimentación y permitir así que la chimenea sea auto-soportada.

Los datos para utilizar para el diseño son los siguientes:

Diámetro sin insulación=3.60 m

Altura de chimenea=90 m

Distancia a ejes entre pernos de anclaje=6.06m

Peso estimado chimenea: $W_c=1278.452$ KN

Espesor=0.016m

Presión permisible del suelo $q_a=90$ KPa

Peso específico del relleno $\delta_{relleno}=16.5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$

Resistencia a compresión de concreto a utilizar $f'_c=21$ MPa

Resistencia a fluencia del acero $F_y=400$ MPa

Peso específico del concreto $\delta_{concreto}=23.6 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$

Ubicación=La Democracia, Escuintla

Exposición=B

Factor de importancia= 1.15

4.16.1. Cálculo de carga de viento

La proyección de la chimenea que tendrá el impacto de la presión del viento estará sujeta a esfuerzos a tensión mientras se combina con el efecto del empuje del viento y el peso de la chimenea. El peso de la sobre carga y que pudiera tener

la chimenea, así como el recubrimiento que le pudiese ser aplicado para protección de esta.

Para el cálculo de fuerzas laterales de viento se utilizará el método de presión proporcionado por AGIES con su Normativa de Seguridad Estructural, sección 2 (NSE-2 2018), para el cual se tomarán los siguientes factores en cuenta:

4.16.1.1. Tipo de exposición

En esta sección de la normativa se consideraría la más crítica la cual es Exposición B pues debido a la ubicación del proyecto estaría expuesto a velocidades considerablemente altas de viento, mayores a 110 kilómetros por hora, y considerando que el terreno donde se ubicará no contará con obstáculo, se vuelve un aspecto considerablemente crítico. En la tabla 5.3.3-1 Coeficiente C_{ez} de AGIES NSE-2 2018 se definen los diferentes valores para el coeficiente según tipo de exposición y altura del nivel del terreno:

Tabla XI. Condiciones de sitio y protección para Guatemala, sección 5

Altura sobre el nivel promedio del terreno (m) [1] [2]	Exposición	Exposición	Exposición
	D	C	B
4.5	1 .39	1.06	0.62
6.0	1 .45	1.13	0.67
7.5	1 .50	1.19	0.72

Continuación tabla XI.

	9.0	1	1.23	0.76
Fuente:		.54		
AGIES	12.0	1	1.31	0.84
(2018) <i>Wind</i>		.62		
<i>Loads on</i>	18.0	1	1.43	0.95
<i>Buildings</i>		.73		
<i>and</i>	24.0	1	1.53	1.04
<i>structures -</i>		.81		
<i>Proposed</i>	30.0	1	1.61	1.13
<i>Draft &</i>		.88		
<i>commentary.</i>	36.0	1	1.67	1.20
		.93		
	48.0	2	1.79	1.31
		.02		
Por lo	60.0	2	1.87	1.42
tanto, el		.10		
	90.0	2	2.05	1.63
		.23		
	120.0	2	2.19	1.80
		.34		

Coefficiente de exposición C_{ez} , se define según la altura sobre el nivel promedio del terreno, en este caso siendo una chimenea de 90 metros de altura, y teniendo una exposición tipo D, se obtendría un valor de C_e :

$$C_{ez}=1.63$$

Coefficiente de presión: este coeficiente definido en la tabla 5.3.6-1 en la sección 5.3.6 de las Normas de seguridad estructural (NSE-2 2018) se definiría como:

Tabla XII. **Condiciones de sitio y protección para Guatemala, sección 5**

4 Chimeneas, tanques, silos, torres sólidas	Planta cuadrada o rectangular	1.4 en cualquier dirección
	Planta hexagonal u octogonoal	1.1 en cualquier dirección
	Planta circular o elíptica	0.8 en cualquier dirección

Fuente: AGIES (2018) *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*.

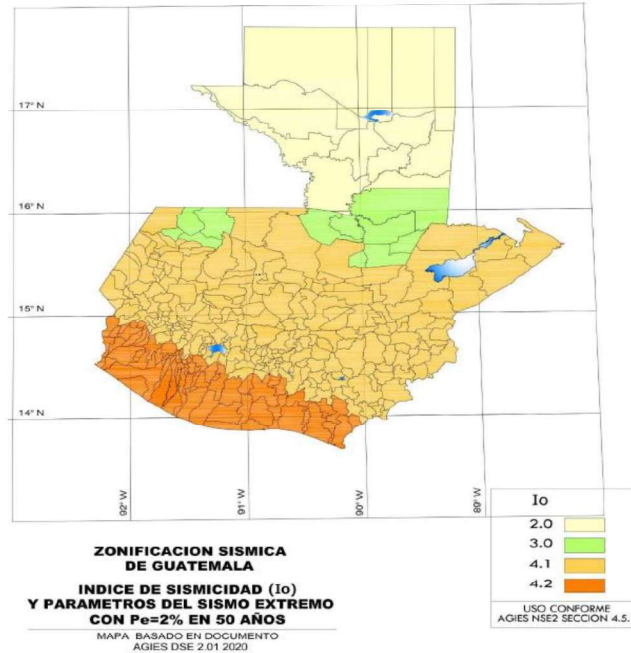
- Estructura: chimenea, tanque y torre sólida
- Descripción: redondo o elíptico
- Factor C_q : 0.8 en cualquier dirección

$$C_q=0.8$$

Presión del remanso del viento q_s , **esta debe obtenerse según la** velocidad básica del viento para la república de Guatemala, según AGIES, en las normas de seguridad estructural parte 2 y la ubicación del proyecto, se experimentarán velocidades de 110 km/h. Si la velocidad básica del viento en kilómetros por hora es 110 la presión en Pascales sería de 573 según la tabla 5.2.1 de AGIES NSE2-18.

Figura 9. **Zonificación sísmica de Guatemala**

Figura 4.5-1 — Mapa de zonificación sísmica de Guatemala



Fuente: AGIES (2028) *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*.

Es decir que el factor q_s sería de 0.573 KPa para una altura de 10 metros sobre el suelo, con lo cual se realiza una relación según la altura, variar la velocidad según su altura:

$$q_s = 0.573 \text{ KPa}$$

Factor de importancia: **el factor de importancia en este proyecto será definido como:**

$$I_c = 1.15$$

Cálculo de presión de diseño de viento:

$$P_w = C_{ez} C_q q_s I_c$$

Cálculo de presión de viento

Donde:

P_w = Presión de diseño por viento a una altura z metros sobre el nivel del suelo ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$)

C_{ez} =coeficiente de exposición y altura,sec. 5.3.3 de AGIES NSE-2 2018 Tabla 5.3.3-1

C_q =Coeficiente de presión según tabla 5.3.6-1 AGIES NSE-2 2018

I_c =Factor de importancia

Se procede a realizar el cálculo a diferentes alturas, para lo cual se tomará en consideración los valores para diferentes alturas planteadas en tabla 5.3.3-1 de AGIES
Continuación tabla XIII.

Tabla XIII. **Resultados de presión de viento a diferentes alturas según ecuación**

Coeficiente de exposición	Coeficiente de presión	Velocidad de viento según altura	Presión de viento según altura	Factor de importancia	Presión de viento
C_{ez}	C_q	V_h (km/h)	q_s	I_c	P (kg/m ²)
0.62	0.8	120	69.12	1.15	39.43
0.67	0.8	120	69.12	1.15	42.61
0.72	0.8	120	69.12	1.15	45.79
0.76	0.8	120	69.12	1.15	48.33
0.84	0.8	120	69.12	1.15	53.42
0.95	0.8	120	69.12	1.15	60.41
1.04	0.8	120	69.12	1.15	66.13
1.13	0.8	120	69.12	1.15	71.86
1.2	0.8	120	69.12	1.15	76.31
1.31	0.8	120	69.12	1.15	83.30
1.42	0.8	120	69.12	1.15	90.30
1.63	0.8	120	69.12	1.15	103.65

Fuente: elaboración propia, adaptado de AGIES (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala.*

La fuerza máxima que ejerce el viento por anillo podría entonces representarse y calcularse de la siguiente manera:

$$M_{w=h_i} = P_w * \text{área de contacto} * \text{altura}$$

Momento generado a partir de presión de aire y altura de contacto.

Basado en el concepto básico de obtención de fuerza multiplicada por una distancia a partir de un punto pivote, para obtención de un momento resultante.

Donde:

M_w = Momento generado debido a viento en la sección analizada (Kn-m)

P_w = Presión de aire en altura analizada

Área de contacto = diámetro del anillo analizado * altura de anillo

Con la ecuación anteriormente descrita se obtendrían los siguientes datos:

Tabla XIV. **Resultados de momento debido a presión de viento a diferentes alturas analizadas según la altura de esta**

Altura sobre nivel de terreno	Coefficiente de exposición	Presión de viento	Presión de viento	Altura por aplicar M_w	Momento debido a viento
h(m)	C_{ez}	P (Pa)	P (KPa)	(m)	M_w (kN-m)
4.5	0.62	386.63	0.39	2.25	22.55
6	0.67	417.81	0.42	5.25	18.95
7.5	0.72	448.99	0.45	6.75	26.19
9	0.76	473.94	0.47	8.25	33.78
12	0.84	523.83	0.52	10.50	95.04
18	0.95	592.42	0.59	15.00	307.11
24	1.04	648.55	0.65	21.00	470.69
30	1.13	704.67	0.70	27.00	410.96
36	1.2	748.32	0.75	33.00	533.40
48	1.31	816.92	0.82	42.00	1,482.22
60	1.42	885.52	0.89	54.00	2,065.73
90	1.63	1016.47	1.02	75.00	8,233.43
TOTAL					13,700.06

Fuente: elaboración propia.

Para obtener el momento de volteo, se aplica un factor de seguridad, en el cual se incrementa un 20 % debido a consideraciones de seguridad, con lo cual se tendría un momento de volteo de 16,440.07 KN-m. y así poder obtener las reacciones del efecto del viento en la base. Se proponen las siguientes características para el diseño de la cimentación:

Diámetro de pedestal donde se apoyará la estructura $d_p=6.06m$

Altura de pedestal $h_p=0.70\text{m}$

Espesor estimado de zapata $t_{zapata}=1.20\text{m}$

Altura de pedestal sobre Nivel de piso terminado $h_{p-NPT}=0.30\text{m}$

Momento que se generará en la base: la fuerza que ejerce la presión del viento debida a la velocidad del mismo por el área de contacto con la chimenea, y el punto actuante donde tendrá efecto el momento flector, que es el origen de donde se toma la referencia de altura, siendo este la base de la cimentación; entonces la altura a analizar es la mitad de la altura de la chimenea adicionalmente a la altura del espesor de zapata, espesor de pedestal y altura que salga el pedestal sobre nivel de piso terminado, con lo cual se re calcula el momento y se acumula según la variación de altura de contacto y diámetro de la chimenea.

Si:

$$M_p = P_w * \left(\frac{h_{chimenea}}{2} + t_{zapata} + h_{p-NPT} + h_p \right)$$

Entonces:

Tabla XV. **Resultados de momento tomando como origen el inicio de la cimentación según la presión de viento a diferentes alturas de la chimenea**

Altura sobre nivel de terreno	Presión de viento	Altura para aplicar M_w	Momento debido a viento
h(m)	P (KPa)	(m)	M_w (kN-m)
4.5	0.39	4.45	44.60
6	0.42	7.45	26.89
7.5	0.45	8.95	34.72
9	0.47	10.45	42.79
12	0.52	12.70	114.96
18	0.59	17.20	352.15
24	0.65	23.20	520.00
30	0.70	29.20	444.45
36	0.75	35.20	568.97
48	0.82	44.20	1,559.86
60	0.89	56.20	2,149.89
90	1.02	77.20	8,474.94
TOTAL			14,334.22

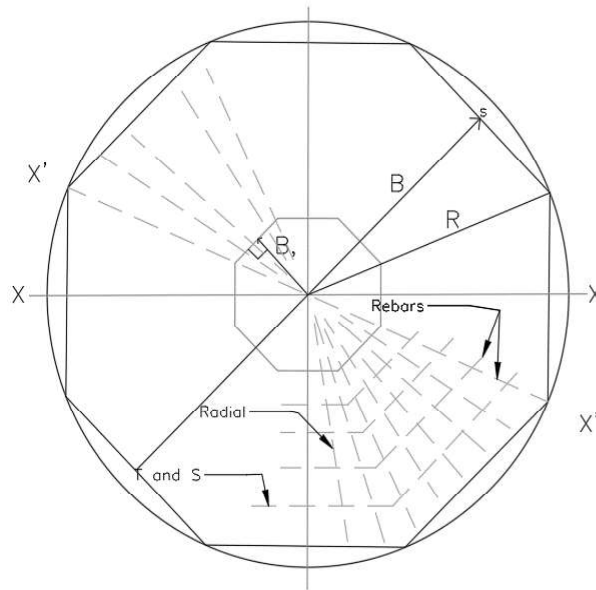
Fuente: elaboración propia.

Tomando un factor de seguridad de 20 % adicionales al momento actuante, se obtiene un momento acumulado de M_b 17,201.06KN-m, con origen en la base de la cimentación.

4.16.2. Criterios de geometría de cimiento

El tipo de cimentación a utilizar se realizará en forma de octágono previendo que, por las propiedades de esta forma de polígono, se garantiza que los esfuerzos serán de forma adecuada distribuidos al suelo, facilidades constructivas, y acertados resultados en la interacción suelo-estructura. Con las propiedades siguientes de un octágono:

Figura 10. Geometría y descripción de las propiedades de un octágono



propiedades de un octágono

Properties of octagon

$$A' = 2B^2 \tan 22.5^\circ = 0.828B^2$$

$$s = 2R \tan 22.5^\circ = 0.765R$$

$$B = 2R \cos 22.5^\circ = 1.848R$$

$$I_{x-x} = I_{x'-x'} = 0.6381R^4$$

$$r_x = r_{x'} = 0.475R$$

$$S_x = 0.6906R^3$$

$$R = 0.5412B$$

Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD.

Se definen las variables:

$$\gamma_{\text{concreto}} = 2403.94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_{\text{suelo relleno}} = 1,680.93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$B = 3d_{\text{pedestal}} = 3 * 6.06\text{m} = 18.18\text{m}$$

$$b_{\text{mod}} = 12.86\text{m}$$

$$\text{Área del octágono (zapata): } A_z = 0.828B^2 = 273.66\text{m}^2$$

$$\text{Área del octágono (pedestal): } A_{z\text{-pedestal}} = 0.828B_{\text{pedestal}}^2 = 30.41\text{m}^2$$

$$\text{Peso del pedestal } W_p = A_{z\text{-pedestal}} * h_p * \gamma_{\text{concreto}} = 51,172.75\text{kg} = 502.33\text{KN}$$

$$\text{Peso de zapata } W_z = A_z * t_{\text{zapata}} * \gamma_{\text{concreto}} = 789,522.43\text{kg} = 7,750.17\text{KN}$$

Relleno sin pedestal

$$W_r = \gamma_{\text{suelo relleno}} * ((A_z * h_p) - (A_{z\text{-pedestal}} * h_p)) = 286,220.47\text{kg} = 2,809.62\text{KN}$$

Peso total de la base $W_b=1,126,915.64\text{kg}=11,062.12\text{KN}$

Peso de montaje $W_m=W_p+W_z+W_{\text{chimenea}}=9,530.95\text{KN}$

$W_{\text{ensayo}}=1,160\text{KN}$

Peso de prueba $W_{\text{prueba}}=W_b+W_{\text{ensayo}}=12,222.12\text{KN}$

Peso en completo $W_T=W_b+W_{op}$

Procede a definirse el peso de operación de la chimenea: W_{op}

4.16.2.1. Chequeo de estabilidad al volteo

Momento durante montaje: $M_r=\text{Peso de montaje}*\frac{B}{2}=76,636.34\text{KN-m}$

El peor caso de volteo será para el montaje con la base sin relleno, los otros dos casos se calculan de similar forma:

Momento por viento: $M_b=17,201.06 \text{ KN-m}$

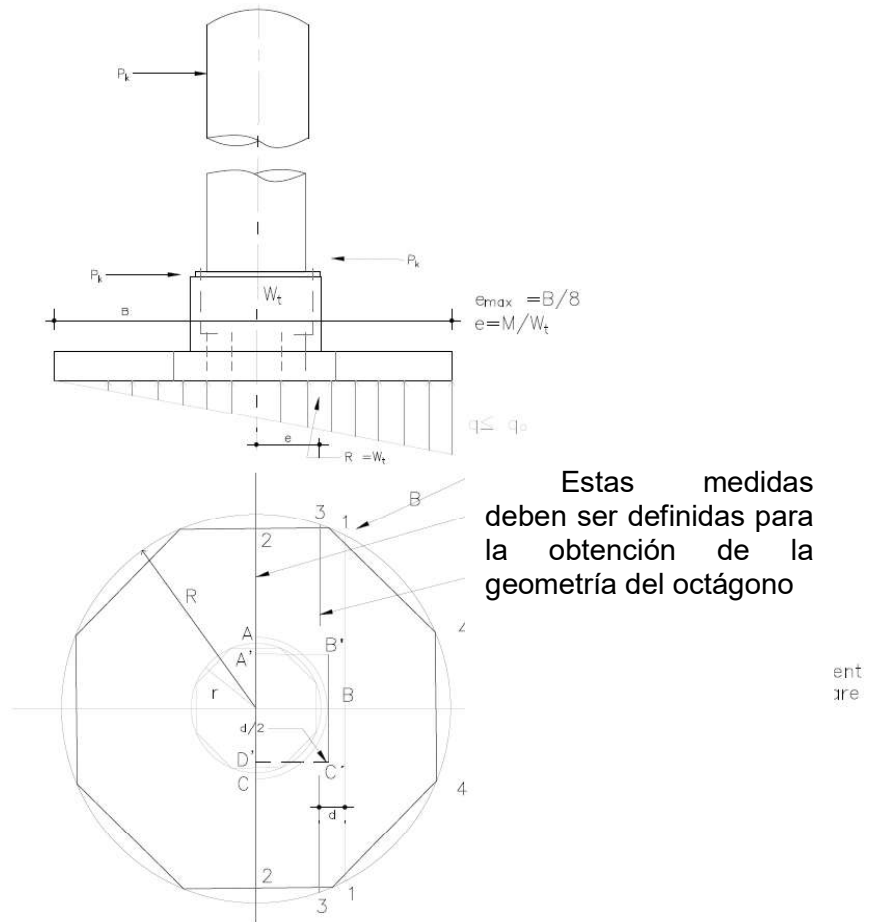
Factor de seguridad: $\frac{M_r}{M_b}=4.45$ por ser mayor a 1.5 es aceptable, en condiciones de trabajo el momento resistente es el peso de la operación en el brazo o palanca actuante:

Momento en condiciones de trabajo: $M_r= W_b *\frac{B}{2}=10,0554.65\text{KN-m}$

Factor de seguridad: $\frac{M_r}{M_b} = 5.84$ por ser mayor a 1.5 es aceptable.

Determinación de presiones para zapata

Figura 11. **Diagrama de presión de cimentación de chimenea, según sus cargas laterales y cargas verticales, en funcionamiento**



Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD.

El peso en la base es la suma del peso total de la cimentación junto con el peso de la estructura en operación:

$$W_b = 11,062.12 \text{ KN}$$

Momento debido a viento $M_b=17,201.06\text{KN-m}$ y la excentricidad sería el momento que genere debido a viento sobre el peso total de la cimentación junto con el peso de la estructura en operación:

Excentricidad

$$e = \frac{M_b}{W_b} = 1.55$$

La mayor excentricidad permisible está limitada a un octavo de la mayor diagonal (diámetro) del octágono analizado, para que la excentricidad esté dentro del rango adecuado

$$\frac{B}{8} = \frac{18.18}{8} = 2.27$$
$$2.27 < 1.55 \text{ OK}$$

Con lo cual la excentricidad se encuentra en el rango permisible, para el radio efectivo de la base según geometría es el equivalente a $R=0.5412B$

$$R = 0.5412B = 9.8439\text{m}$$

El módulo de sección sobre el eje X está definido como:

$$S_x = 0.6906R^3 = 658.76\text{m}^3$$

La carga distribuida crítica que generará la cimentación debe ser menor a la capacidad admisible del suelo para no experimentar desplazamientos verticales indeseables y que expongan la seguridad de la estructura, su integridad y su bienestar. La carga crítica sería la división de la carga completa

sobre su área de acción junto con el momento debido a fuerzas laterales como viento sobre el radio de giro, basados en este concepto que es el caso más crítico que podría experimentar la cimentación se procede a calcular el valor:

$$q = \frac{W_b}{A_z} \pm \frac{M_b}{S_x} \leq q_{\text{admisible}}$$

Presión generada según el momento debido a fuerzas y geometría de base basado en el concepto de presión generada por fuerzas externas a la chimenea, para obtención de una presión resultante, comparada contra la presión admisible del suelo.

Para el caso donde el momento actuante es positivo:

$$q_t = \frac{W_b}{A_z} + \frac{M_b}{S_x} = \frac{11062.12 \text{ KN}}{273.66 \text{ m}^2} + \frac{17,201.06 \text{ KN-m}}{658.76 \text{ m}^3} = 66.53 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

En el caso negativo:

$$q_h = \frac{W_b}{A_z} + \frac{M_b}{S_x} = \frac{11062.12 \text{ KN}}{273.66 \text{ m}^2} - \frac{17,201.06 \text{ KN-m}}{658.76 \text{ m}^3} = 14.31 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Según la capacidad permisible del suelo

Presión permisible del suelo $q_a = 90 \text{ KPa}$

Tanto el primer caso de carga como el segundo son menores, por lo que se considera una condición segura en cuanto a estabilidad.

Se chequea el espesor de la zapata por esfuerzos cortantes generados debido a las diferentes combinaciones de carga.

Para lo cual se toman las siguientes condiciones:

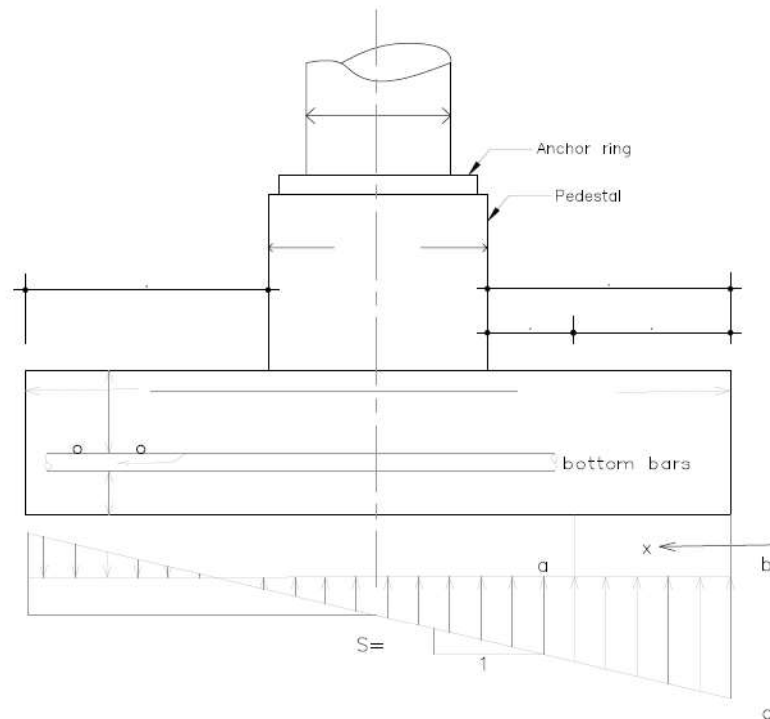
Espesor estimado de zapata $t_{zapata}=1.20m$

Recubrimiento $R=0.07m$

Diámetro de varilla de refuerzo $\varnothing_{No.8}=2.54cm$

Peralte efectivo de zapata $d_{zapata}=1.105m$

Figura 12. **Diagrama de presión de cimentación de chimeneas y sus reacciones**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El caso de carga cortante entonces se establece como:

$$S = \frac{q_t - q_h}{B}$$

Carga cortante aplicada a suelo basado en el concepto de geometría, para obtención de una presión resultante.

Con lo cual se utiliza la diferencia de cargas previamente calculadas:

$$q_t = 66.53 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$q_h = 14.31 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Entonces:

$$S = \frac{q_t - q_h}{B} = \frac{66.53 + 14.31}{18.18} = 4.45$$

$$L_h = \frac{B - d_{pedestal}}{2} = 6.06\text{m} = x$$

$$q_{admisible} = q_t - s(x) = 39.563$$

$$V_{adm} = \text{Factor de carga} * \frac{q_t + q_{ad}}{2} * x = 1.4 * \frac{66.53 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} + 39.56 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}}{2} * 6.06\text{m}$$

$$V_{adm} = 450.03 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

Corte resistente de sección

$$f'_c = 21\text{MPa}$$

Según la normativa ACI 318-19 tomando el factor de corte para una viga, pues se realiza la analogía de una franja unitaria, para replicarla en el resto de la cimentación. La ACI 318-19 en su tabla ubicada en la sección 22.6.6.1 Esfuerzo cortante permisible en concreto para miembros en 2 direcciones con refuerzo a cortante

$$V_s = 2\phi \sqrt{f'_c} \text{ (PSI)} = \frac{\phi \sqrt{f'_c}}{6} \text{ (MPa)}$$

Cortante resistente para un miembro de concreto reforzado

$$V_s = \frac{0.85\sqrt{21\text{MPa}}}{6} = 0.649\text{MPa}$$

$$V = 0.649\text{MPa} = 649,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$V_c = V \cdot b \cdot d = 649,900 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 1\text{m} \cdot 1.105\text{m} = 717,145 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 717.15 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

Debido a que el corte actuante máximo es menor al permisible cumple adecuadamente el espesor propuesto:

$$V_c = 717.15 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \gg V_{\text{adm}} = 450.03 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

OK

Para obtener el área de acero de refuerzo que requiere la cimentación se procede a tomar como referencia la longitud de la zapata libre después del pedestal:

$$L_h = \frac{B - d_{\text{pedestal}}}{2} = 6.06\text{m}$$

$$q_{(x)} = q_{\text{max}} - s(x) = 66.53 - 4.45x$$

$$M = \int_0^L q \, dx = \frac{q_{\text{max}} \cdot L^2}{2} - \frac{sL^3}{6} = \frac{66.53\text{KPa} \cdot (6.06\text{m})^2}{2} - \frac{4.45\text{m} \cdot (6.06\text{m})^3}{6}$$

$$M = -150.15 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \cdot \text{m}$$

$$f_c = 21\text{MPa}$$

$$F_y = 420\text{MPa} = 4200 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 411879.3 \text{KPa}$$

$$\text{Franja de análisis: } b = 1.00\text{m}$$

$$\text{Momento último a resistir: } M_u = 1.4M = -210.21 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \cdot \text{m}$$

$$\text{Peralte efectivo: } d = 1.105\text{m}$$

$$\text{Factor de seguridad: } \phi = 0.90$$

$$\frac{M_u}{\phi F_y} = 0.00055 \frac{\text{KN}}{\text{m}} * \text{m}$$

$$a = \frac{f_y A_s}{0.85 * f'_c * b} = 22.41 A_s$$

$$\frac{a}{2} = 11.205 A_s$$

$$a \text{ propuesto} = 0.025 \text{m}$$

Se propone una densidad de acero basándose en

$$A_s = \frac{M_u}{\phi f_y (d - \frac{a}{2})} = 0.00036359 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = 3.64 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

de acero de refuerzo con menor "a"

El acero requerido por contracción y temperatura según criterios de ACI 318 es:

$$A_s = 0.0018 b * d = 19.89 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Se procede a calcular el acero mínimo con el que debería de chequear la propuesta:

$$A_{s-\text{min}} = \frac{1.4}{F_y} b * d = \frac{1.4}{420 \text{MPa}} * 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} * 101.5 \text{cm} = 36.83 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

De los 3 criterios se procede a tomar el área de refuerzo mínimo, que sería una densidad de 36.83 cm²/m con lo cual si se proponen varillas de refuerzo No.8 se consigue un área de acero de 5.067cm² con cada una con lo cual para el área de acero de refuerzo requerida deberían de distribuirse las varillas con el siguiente espaciamiento:

$$\text{Cantidad de varillas} = \frac{A_s}{A_s \text{ No8}} = \frac{36.83 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}}{5.067 \frac{\text{cm}^2}{\text{varilla}}} = 7.27 \frac{\text{varillas}}{\text{metro}}$$

$$\text{Espaciamiento de varillas: } s = \frac{7.27 \text{ varillas}}{100\text{cm}} = 13.75\text{cm}$$

≈13cm entre centroides de varillas

Para el acero de refuerzo para la cama superior, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L_f = 1.4$$

$$L_h = 6.06$$

$$h_p = 0.70\text{m}$$

$$M_u = L_f * (t_{\text{zapata}} * \gamma_c + h_p * \gamma) * \left(\frac{L_h^2}{2} \right)$$

Momento resistente para un miembro de concreto reforzado

$$M_u = 1.40\text{m} * \left(1.20\text{m} * 23.6 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} + 0.70\text{m} * 16.50 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \right) * \left(\frac{6.06^2}{2} \right)$$

$$M_u = 1,024.92 \text{ KN-m}$$

Con lo cual se estaría proponiendo el acero de refuerzo mínimo calculado anteriormente para el caso de la variable "a" mínima que puede existir:

$$A_s = 3.64 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Cantidad de varillas} = \frac{A_s}{A_s \text{ No8}} = \frac{3.64 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}}{5.067 \frac{\text{cm}^2}{\text{varilla}}} = 0.7183 \frac{\text{varillas}}{\text{metro}}$$

Espaciamiento de varillas para cama superior propuesto:

s=26cm entre centroides de varillas

El espaciamiento para la cama superior es mayor al requerido, pero se propone de esta manera por facilidad constructiva, siendo así que cada varilla de refuerzo de la cama superior estará en relación con la cama inferior de forma que por cada 2 varillas de la cama inferior exista una en la cama superior.

Para el refuerzo del pedestal, se toma en consideración el diámetro a eje de refuerzo:

$$\text{Diámetro a eje de refuerzo: } d_p - h_{p-NPT} = 6.06\text{m} - 0.30\text{m} = 5.76\text{m}$$

$$M_u = P_w * \left(\frac{h_{\text{chimenea}}}{2} + t_{\text{zapata}} + h_{p-NPT} + h_p \right) = 17,201.06 \text{ KN-m}$$

$$A_p = \frac{17,201.06 \text{ KN-m}}{\varnothing 411,879.30 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \left(5.76\text{m} - \frac{0.025\text{m}}{2} \right)} = 0.0091$$

$$A_p = 30.41\text{m}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = 0.01A_p = 0.3041\text{m}^2 = 3041\text{cm}^2$$

$$W_p = A_{z\text{-pedestal}} * h_p * \gamma_{\text{concreto}} = 51,172.75\text{kg} = 502.33\text{KN}$$

$$f_s = 0.90F_y = 378\text{MPa}$$

$$NA_s = \frac{1.4}{f_s} \left(\frac{4 * M_o}{B_p} - W \right) = \frac{1.4}{378,000\text{KPa}} \left(\frac{4 * 17,201.06\text{KN-m}}{6.06\text{m}} - 502.3\text{KN} \right) = 0.0401\text{m}^2$$

$$NA_s = 401.91\text{cm}^2$$

Varilla de refuerzo propuesta: número 8

$$A_{s \text{ No.8}} = 5.067\text{cm}^2$$

Cantidad de varillas requeridas = 79.32 ~ 80 varillas

4.17. Análisis de modelo con software

Para poder generar una comparativa numérica del modelo anteriormente analizado, debe Se procede a realizar un modelo con la geometría obtenida en la sección anterior sobre software especializado para análisis de elementos

finitos. Iniciando con la definición del modelo y la discretización de este, se procede a analizar el modelo en su forma simple, aunque representando la estructura de la chimenea

4.18. Definición de modelo

La geometría del modelo será definida según el chequeo realizado en el capítulo 3, siendo la siguiente:

Figura 13. **Creación de modelo en software SAP2000 V20.1 (CSI
computers and structures)**



Fuente: elaboración propia, utilizando SAP 2000 de CSI.

Se procede a definir el tipo de material para la lámina de la chimenea:

Figura 14. **Definición de material acero ASTM A 992 Fy=50KSI**

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: A992Fy50

Material Type: Steel

Material Grade: Grade 50

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7849.0476

Mass per Unit Volume: 800.3801

Units

Units: Kgf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 2.039E+10

Poisson, U: 0.3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 7.842E+09

Other Properties For Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 35153481.

Minimum Tensile Stress, Fu: 45699526.

Expected Yield Stress, Fye: 38668829.

Expected Tensile Stress, Fue: 50269478.

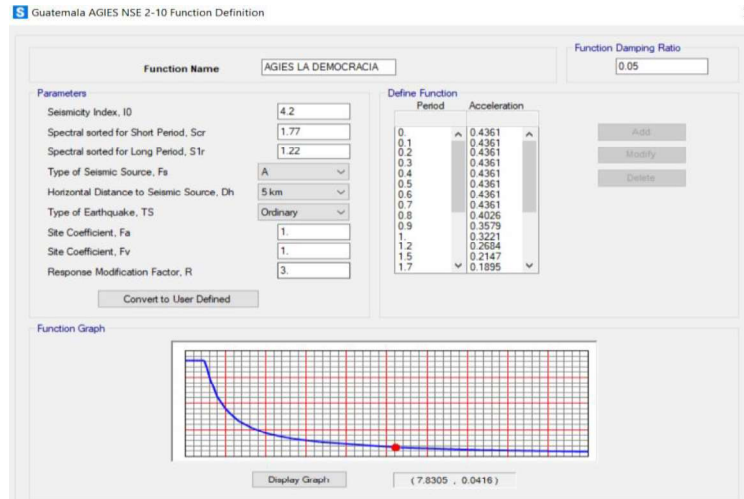
Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Fuente: elaboración propia.

La definición del espectro de diseño sísmico sería la siguiente tabla:

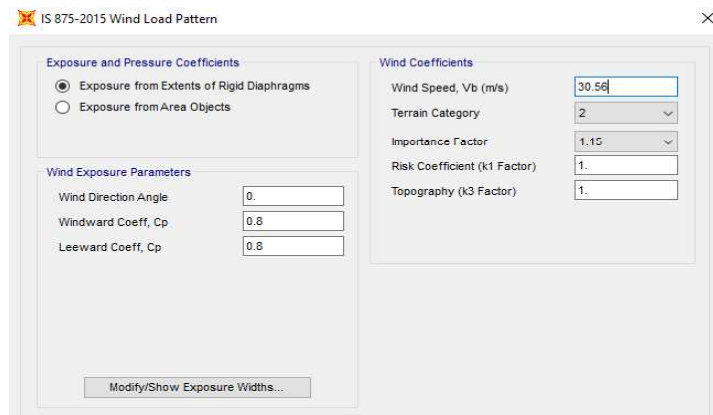
Figura 15. **Espectro de aceleración sísmica según AGIES NSE 2-10 definido en software**



Fuente: elaboración propia.

Asignación de carga de viento, se define el tipo de carga según normativa y las características del proyecto

Figura 16. **Asignación de carga lateral debida a viento sobre superficie de chimenea**



Fuente: elaboración propia.

Según las cargas de viento definidas con los criterios de IS se procede a calcular la fuerza distribuida sobre el rostro de aplicación de la chimenea; se toma como referencia la proyección de la chimenea que estará bajo efectos de presión.

Tabla XVI. **Resultados de momento tomando como origen el inicio de la cimentación según la presión de viento a diferentes alturas de la chimenea**

Tramo de altura analizada	Diámetro	Espesor	área		Carga de viento equivalente distribuida	
			Øtop	m	m ²	KN/m
De (m)	Hasta (m)	(m)	m	m	m ²	KN/m
75	90	3.6	16	16	54.0	0.99
60	75	3.6	16	16	55.0	1.92
45	60	3.6	16	16	56.0	2.78
30	45	3.6	20	20	57.0	3.56
15	30	4.68	25	25	58.0	4.15
0	15	5.76	25	25	59.0	4.98

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Asignación de carga lateral debida a viento sobre superficie de chimenea**

Assign Area Uniform Loads

General

Load Pattern: W

Coordinate System: GLOBAL

Load Direction: X

Uniform Load

Load: -4.98 kN/m²

Options

Add to Existing Loads

Replace Existing Loads

Delete Existing Loads

Fuente: elaboración propia.

Asignación de temperatura debida a humos circulantes en la chimenea:

Figura 18. **Asignación de carga por temperatura debida a los gases a expulsar a través de chimenea**

Assign Area Temperature Loads

Load Pattern: CT

Type

Temperature

Temperature Gradient 3-3

Temperature

By Element

Temperature: 200 C

By Joint Pattern

Joint Pattern: [Empty]

Multiplier: [Empty]

Fuente: elaboración propia.

Creación de combinación de cargas:

Figura 19. **Combinación de carga CR1**

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated) CR1

Notes Modify/Show Notes...

Load Combination Type Linear Add

Options

Convert to User Load Combo Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
DEAD	Linear Static	1.4

Add
Modify
Delete

OK Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Combinación de carga CR2**

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated) CR2

Notes Modify/Show Notes...

Load Combination Type Linear Add

Options

Convert to User Load Combo Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
CV	Linear Static	1.6
DEAD	Linear Static	1.3
CV	Linear Static	1.6

Add
Modify
Delete

OK Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Combinación de carga CR4 para sismo en dirección positiva**

Load Combination Name (User-Generated): CR4+

Notes: Modify/Show Notes...

Load Combination Type: Linear Add

Options: Convert to User Load Combo, Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
Sismo	Response Spectrum	1
DEAD	Linear Static	1.2
CV	Linear Static	1
Sismo	Response Spectrum	1

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Combinación de carga CR4 para sismo en dirección negativa**

Load Combination Name (User-Generated): CR4-

Notes: Modify/Show Notes...

Load Combination Type: Linear Add

Options: Convert to User Load Combo, Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
Sismo	Linear Static	1
DEAD	Linear Static	1.2
CV	Linear Static	1
Sismo	Response Spectrum	-1

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Combinación de carga CR6**

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated): CR6

Notes: Modify/Show Notes...

Load Combination Type: Linear Add

Options: Convert to User Load Combo, Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
CW	Linear Static	1.0
DEAD	Linear Static	1.2
CV	Linear Static	1.0
CW	Linear Static	1.0

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Combinación de carga CR7 con viento a favor**

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated): CR7+

Notes: Modify/Show Notes...

Load Combination Type: Linear Add

Options: Convert to User Load Combo, Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
CW	Linear Static	1.3
DEAD	Linear Static	0.9
CW	Linear Static	1.3

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Combinación de carga CR7 con viento en contra**

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated) CR7-

Notes Modify/Show Notes...

Load Combination Type Linear Add

Options

Convert to User Load Combo Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
CW	Linear Static	-1.3
DEAD	Linear Static	0.9
CW	Linear Static	-1.3

Add Modify Delete

OK Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Combinación de carga CR12**

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated) CR12

Notes Modify/Show Notes...

Load Combination Type Linear Add

Options

Convert to User Load Combo Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

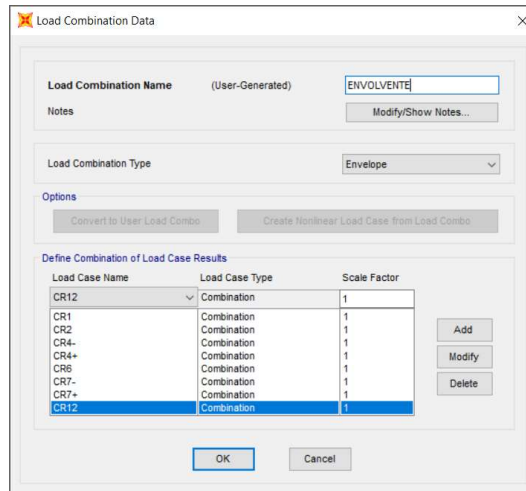
Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
CT	Linear Static	1.2
CR2	Combination	1
CT	Linear Static	1.2

Add Modify Delete

OK Cancel

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Combinación de cargas para estimar valores máximos de esfuerzos**



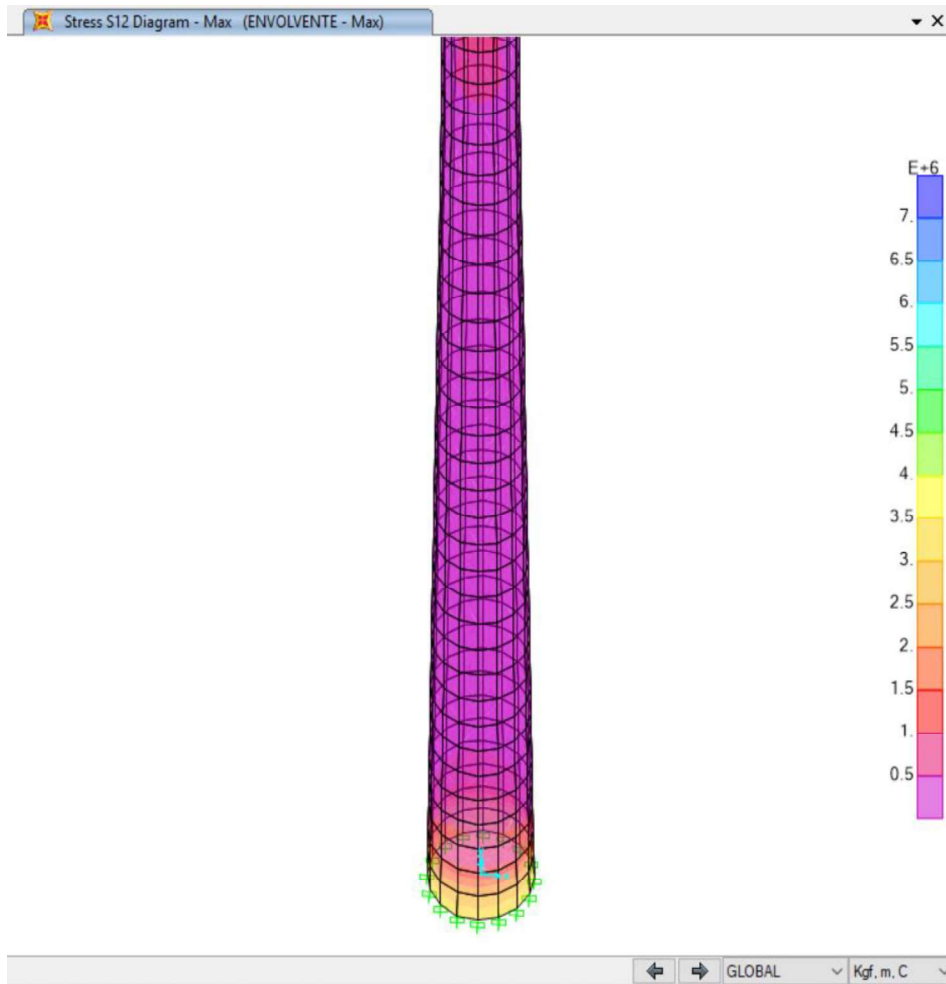
Fuente: elaboración propia.

4.19. Resultados de modelo

Se realiza el análisis de la chimenea industrial de acero de 90 metros, y se obtienen los siguientes resultados:

Según la envolvente de fuerzas de las combinaciones designadas en el capítulo 3 se obtienen los siguientes resultados:

Figura 28. **Esfuerzos en chimenea según combinaciones de carga en la base**



Fuente: elaboración propia, empleando SAP 2000 de CSI.

Donde claramente puede observarse la concentración de esfuerzos en la parte inferior de la chimenea.

Según el modelo analizado se obtienen los resultados siguientes:

Tabla XVII. **Resultados obtenidos según cargas y combinaciones asignadas al elemento placa del cual está compuesto la chimenea**

TABLE: Element Stresses - Area Shells				
Area	OutputCase	SMaxTop	SAngleTop	SMaxBot
Text	Text	Kgf/m2	Degrees	Kgf/m2
17	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
17	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
47	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
47	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
77	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
77	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
107	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
107	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
137	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
137	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
167	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
167	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
197	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
197	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
227	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
227	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
257	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64
257	CR12	21,081,425.01	-26.78	24,837,917.64
287	CR12	21,081,425.01	26.78	24,837,917.64

Fuente: elaboración propia.

Para poder comparar el esfuerzo máximo permisible en la lámina de recubrimiento IS 6533 parte 2 en la tabla “Maximum permissible stress for circular chimneys” (tabla II de esta investigación) sugiere realizar la comparación de la relación entre altura efectiva de la chimenea dividido el diámetro al nivel analizado, con la relación entre diámetro y espesor, entonces:

$$\text{Relación} = \frac{h_e}{D} = 28.04$$

Ecuación 7. Relación He/D

$$\text{Relación} = \frac{D}{t} = 164.61$$

Ecuación 8. Relación D/t

La relación de 28.04 y 164.61 permite un esfuerzo máximo permisible en MPa de 103MPa (103,000,000 Kg/m²) y según los esfuerzos actuantes máximo se obtuvo un resultado de 21.08Mpa

4.20. Resultados de análisis estructural

A continuación, se presentan y exponen los resultados que se obtuvieron del análisis estructural.

4.20.1. Período natural de la estructura

En la tabla XVIII se puede observar el detalle de los resultados obtenidos en donde se determina un periodo natural.

Tabla XVIII. **Resultados obtenidos para la participación modal donde se determina un período natural de 1.44 segundos**

TABLE: Modal Participating Mass Ratios				
Case	OutputC ype	StepT	StepN um	Perio d
	Text	Text	Unitle ss	Sec
MODAL		Mode	1	1.438 293
MODAL		Mode	2	1.438 293
MODAL		Mode	3	0.301 593
MODAL		Mode	4	0.301 593
MODAL		Mode	5	0.296 265
MODAL		Mode	6	0.296 265
MODAL		Mode	7	0.266 891
MODAL		Mode	8	0.266 891
MODAL		Mode	9	0.220 208
MODAL		Mode	10	0.220 208
MODAL		Mode	11	0.161 803
MODAL		Mode	12	0.161 803

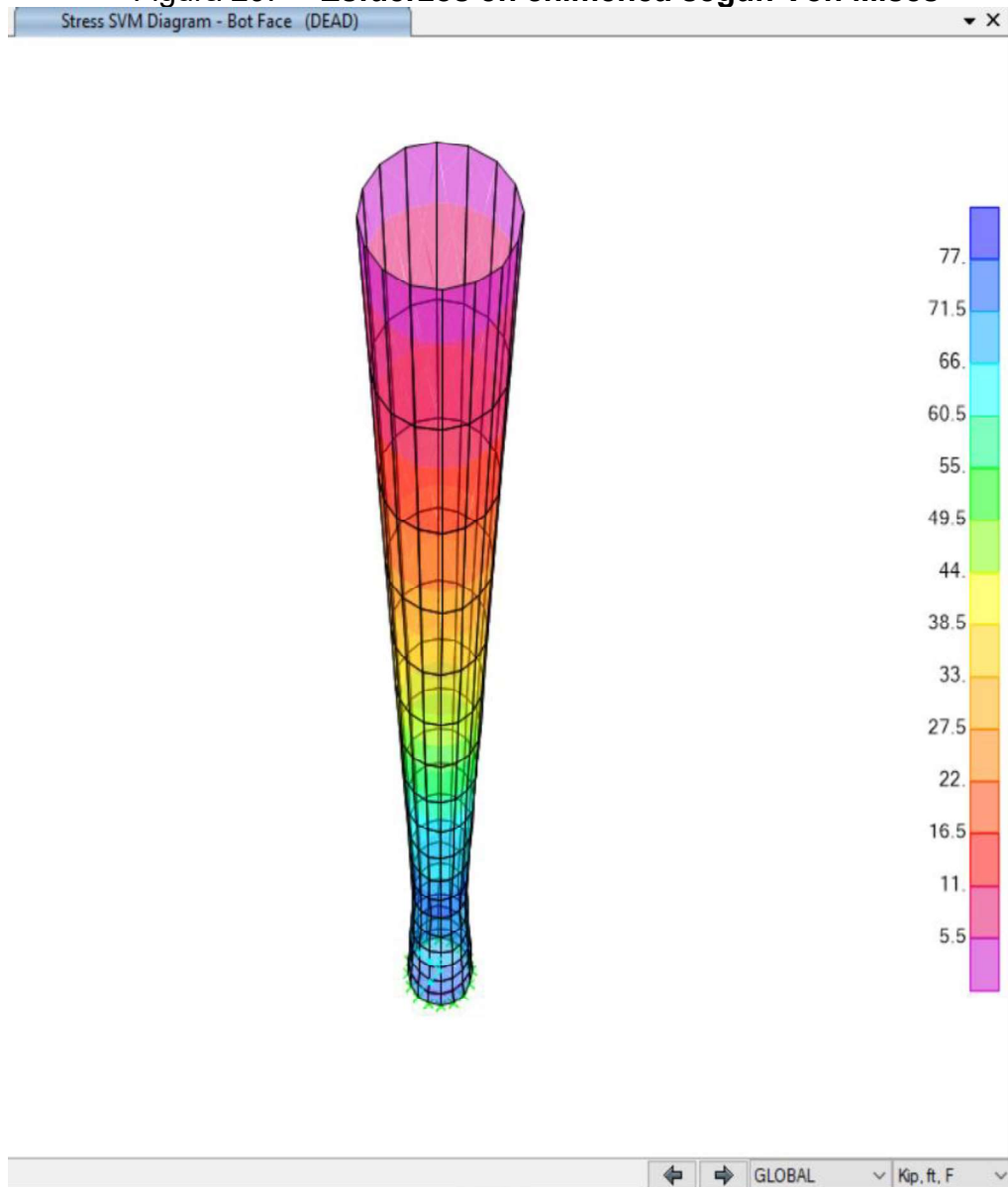
Fuente: elaboración propia.

4.20.2. Esfuerzos Von Mises

El criterio de plasticidad propuesto en 1,913 por Von mises, fue basado en un criterio de plastificación en el cual se alcanza cierta tensión en sus componentes, un punto sólido. En el que se demuestran los esfuerzos obtenidos

en el programa. Para una mejor explicación se presenta la siguiente figura en donde se puede observar el esfuerzo en chimeneas que nos propones este autor.

Figura 29. **Esfuerzos en chimenea según Von Mises**

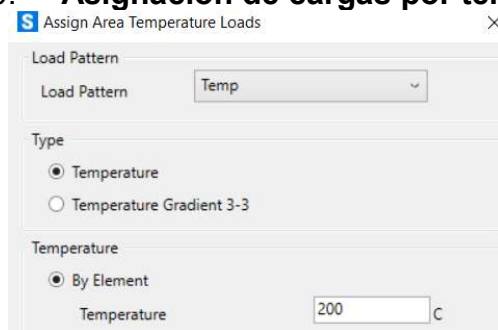


Fuente: elaboración propia, empleando SAP 2000 de CSI.

4.20.3. Esfuerzos debidos a temperatura

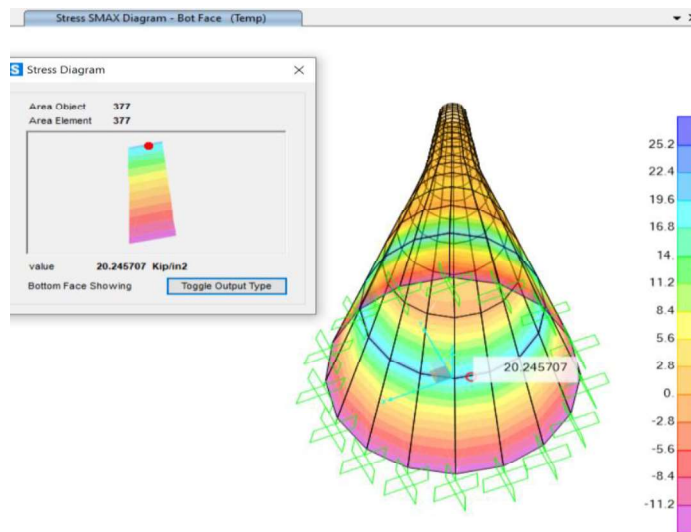
Según la sección 3.3.20 de esta investigación se asigna una carga de 200°C debido la temperatura a la cual se evacúan los gases de caldera que circularán por una chimenea:

Figura 30. **Asignación de cargas por temperatura**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Resultados de esfuerzo en lámina donde el máximo no supera los 25kip**



Fuente: elaboración propia, empleando SAP 2000 de CSI.

4.20.4. Cálculo de derivas

Se asignan los parámetros correctos para el cálculo de empuje debido a aceleración sísmica

Figura 32. Definición de empuje o aceleración sísmica

Load Case Name: SX0

Load Case Type: Response Spectrum

Modal Combination:

- CQC
- SRSS
- Absolute
- GMC
- NRC 10 Percent
- Double Sum

GMC f1: 1

GMC f2: 0

Periodic + Rigid Type: SRSS

Modal Load Case:

Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

- Standard - Acceleration Loading
- Advanced - Displacement Inertia Loading

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	AGES LA DEMO	1

Diaphragm Eccentricity:

Eccentricity Ratio: 0

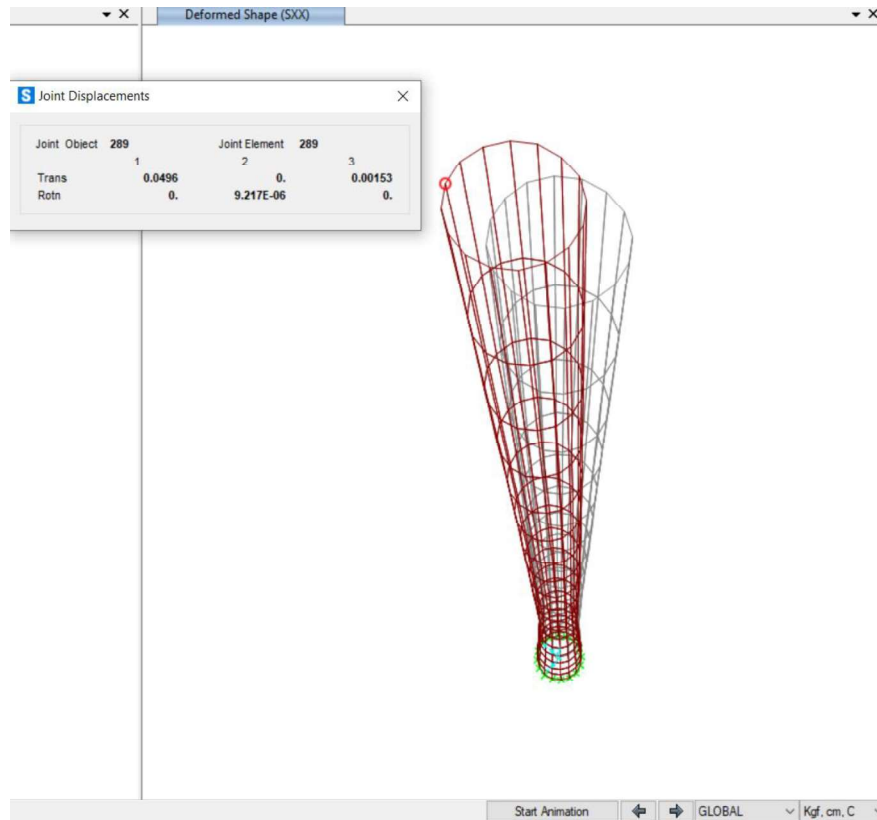
Other Parameters:

Modal Damping: Constant at 0.05

Fuente: elaboración propia.

Ya que el peso es relativamente bajo no se alcanzan grandes deformaciones o derivas.

Figura 33. **Desplazamiento máximo generado debido a sismo donde el resultado de desplazamiento es 0.05cms**



Fuente: elaboración propia, empleando SAP 2000 de CSI

CONCLUSIONES

1. Se demuestra que pueden tomarse parámetros de diseño para una chimenea industrial de acero utilizando y adaptando la normativa de la India, ya que, según lo demostrado en esta investigación, ha permitido crear un diseño óptimo que cumple con los requerimientos mecánicos y operativos, presentando los resultados donde se demuestra la adecuada resistencia a las demandas estructurales y solicitudes que plantea AGIES en su Norma de Seguridad Estructural (NSE de 2018 con su actualización de 07/2020) que considera los lineamientos específicos para la región de Guatemala.
2. El análisis y cálculo de esfuerzos a partir de las ecuaciones planteadas en la normativa India permiten calcular por medio de tablas de hojas de cálculo, las cargas aplicadas a diferentes alturas de la chimenea, así como también utilizando las ecuaciones respectivas se demuestra que no se sobrepasa la capacidad admisible de los materiales, cálculos que posteriormente se han demostrado por medio de software de análisis estructural por medio de elementos finitos donde se muestra que resiste adecuadamente esta demanda estructural.
3. La normativa de la india presenta un esquema paso por paso, donde se calculan desde los parámetros de la geometría hasta los esfuerzos que debe resistir la chimenea, aun siendo estos los obtenidos según AGIES, con lo cual se puede dar por concluido que esta normativa contiene un fundamento adecuado y seguro para el país de Guatemala.

RECOMENDACIONES

1. Deben aplicarse correctamente las demandas, cargas y criterios de seguridad planteados en AGIES en su Norma de Seguridad Estructural (NSE de 2018 con su actualización de 07/2020) ya que el aspecto sísmico y el departamento o municipio a ubicar el proyecto tendrán mucha influencia según las tablas de AGIES.
2. Deben realizarse los cálculos según las ecuaciones que se toman de la normativa india y se debe realizar un modelo matemático para que pueda la computadora realizar sus procesos de análisis por medio de elementos finitos y así brindar los resultados y demandas estructurales para demostrar que resiste adecuadamente las licitaciones estructurales.
3. Para los materiales por utilizar en la chimenea deben tomarse en consideración normativas como ASTM (o normas de origen estadounidense) debido a que comercialmente en Guatemala son las más comunes y accesibles, que se ha demostrado cumplen con los requerimientos estructurales.

REFERENCIAS

1. ACI, A. C. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Guatemala: Autor.
2. Ali, V. B. (2009). *Análisis de vibraciones aeroelásticas en estructuras esbeltas sometidas a cargas de viento*. (Tesis de doctorado). Universidad de Valladolid. España. Recuperado de: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/111>.
3. ASME. (2006). *Steel Stacks; ASME STS-1-2006 An american national standard*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
4. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Guatemala: AGIES.
5. Ávila Jiménez, G., y Valdés Vásquez, J. (2014). *Efectos dinámicos de viento en chimeneas industriales de acero*. (1ª edición). Guanajuato, Mexico: Editorial de la Universidad de Guanajuato.
6. Btharun, K. R., Abdul, M. H., y Ramu, P. (2014, July). Engineering Research *IJMER*. 7(21) Recuperado de: www.ijmer.com.
7. Barreno López, R. (2014). *Diseño de chimeneas industriales en concreto reforzado, con base en el código ACI 307*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
8. Christie, W. W. (1902). *Chimney Design and theory* (2a. edición). New York: Printing Company.

9. CICIND. (marzo 1999). *Model code for steel chimneys*. (2ª edición.) T Zurich, Switzerland: Autor.
10. Del Solar Bermejo, J. (1985). *Técnicas actuales para el proyecto y la construcción de las grandes chimeneas industriales*. España: CSIC
11. HMSO. (1993). *Clean Air 1993*. Londres: HMSO Publications Centre.
12. Indian Standard (2002). *Design and construction of steel chimney - Code of practice part 1: Mechanical aspect*. New Delhi. UDC.
13. IOP (2018) *Effective height of chimney for biomass cook stove simulated by computational fluid dynamics*. Indonesia: Malikussaleh University. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/308/1/012043/pdf>
14. Izquierdo Estallo, S. (s.f.). *Diseño inverso de chimeneas industriales, minimización del impacto ambiental y reducción de costes mediante el uso de algoritmos genéticos*. (Trabajo de licenciatura) Politécnico superior, Universidad de Zaragoza, España.
15. Krishna, D. K. (2005). *IS: 875 (Part 3): Wind Loads on Buildings and structures - Proposed Draft & commentary*. República de la India: Indian Institute of Technology Roorkee.
16. Mishra, G. (1989). *The constructor*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <https://theconstructor.org/structural-engg/steel-chimney-types-design/980/>
17. Mohammad Imran, S., Pervaiz UI, H., Redwana, S. (2017). A case study on steel chimney. (IJESAST, Ed.) *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2(2455-2143), 135-137.

18. Pär, T., y Göran, A. (2002). *Dynamic behaviour under wind loading of a 90m steel chimney*. Växjö, Sweden: VEAB.
19. Pooja, S. (1 de febrero de 2017). Finite element of steel (Analysis of self supported steel chimney as per indian standard). *Journal of Research*. (1) 3-6. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/378272964/Finite-Element-of-Steel-Analysis-of-Self-Supported-Steel-Shimney-as-Per-Indian-Standard>
20. Rakshith, B., Ranjith, A., Sanjith, J., y Chethan, G. (mayo 2015). Analysis of Cantilever Steel Chimney As Per Indian Standards. *Journal of Engineering Research and Applications*, 151-162.
21. Sahoo, K. (mayo 2012). *Analysis of Self Supported Steel Chimney as Per Indian Standard*. Orissa, India: Department of Civil Engineering, National Institute of technology Rourkela.
22. Satish, K. (2016). *Wind and earthquake analysis of self supported steel chimney*. Haryana, Kurushetra, India: Department of Civil Engineering.
23. Shubham, S., Abhushek, K., y Mohd, A. (2012). *Analysis of self supporting steel chimney as per indian standard*. India: Rourkela. Recupaerado de: www.irjet.net
24. UBC, O. I. (1982). *Uniform Building Code*. California: Library of Congress
25. Valdés Vásquez, J. G., Ávila Jiménez, G., y Hernández Martínez, A. (2010). *Interacción viento-estructura de una chimenea industrial de acero*. sociedad mexicana de ingeniería estructural. XVII Congreso nacional de ingeniería estructural, llevado a cabo en León, Guanajuato. México.

26. Valdés, J. G., Hernández, H., y Hernández, A. (abril de 2010). *Análisis aeroelástico de chimeneas de acero utilizando elementos no-lineales de lámina sin rotación*. Barcelona, España: UPC.
27. Villón Barona, H. R., y Peña, J. (2003). *Análisis de la integridad estructural de una chimenea en una planta cementera*. Guayaquil, Ecuador: Repositorio Dspace.
28. Visentini, G. (2014). *Acciones del Viento sobre las Obras de Infraestructuras Civil y de Servicio: Estudio de los Efectos de La Vorticidad De Von Karman*. Caracas, Venezuela: UCAB.