



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO
REFORZADO, CON BASE EN EL CÓDIGO ACI 307**

Rodrigo Barreno López

Asesorado por el Ing. Eduardo Ramírez Saravia

Guatemala, enero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO
REFORZADO, CON BASE EN EL CÓDIGO ACI 307**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RODRIGO BARRENO LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. EDUARDO RAMÍREZ SARAVIA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ENERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| VOCAL V | Br. Sergio Alejandro Donis Soto |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|---|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Salvador Gordillo García |
| EXAMINADOR | Ing. Alan Geovani Cosillo Pinto |
| EXAMINADOR | Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velázquez |
| 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:

DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO REFORZADO, CON BASE EN EL CÓDIGO ACI 307

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha febrero de 2013



Rodrigo Barreno López

Guatemala 26 de septiembre de 2013

Ingeniero

Ronald Estuardo Galindo Cabrera

Coordinador del Área de Estructuras

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Galindo:

Por medio de la presente, le informo que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado **DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO REFORZADO, EN BASE AL CÓDIGO ACI 307**, desarrollado por el estudiante Rodrigo Barreno López, quien se identifica con el carné 2009-15005. Por lo que este trabajo lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente:



Ing. Eduardo Ramírez Saravia

No. de colegiado: 1131

Ing. EDUARDO RAMÍREZ SARAVIA

Colegiado 1131

12 Avenida 15-72, Zona 10

Tels.: 23633424 -34-45

E-mail: iersgt@hotmail.com



Guatemala,
11 de noviembre de 2013

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

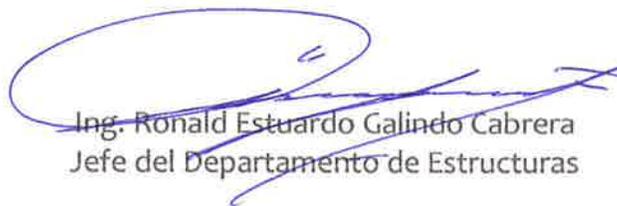
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO REFORZADO, EN BASE AL CÓDIGO ACI 307, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Rodrigo Barreno López, quien contó con la asesoría del Ing. José Eduardo Ramírez Saravia.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
Jefe del Departamento de Estructuras



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
ESTRUCTURAS
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San
Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de Lingüística

Guatemala, 20 de enero de 2014
Ling.4/14

Ingeniero Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, USAC

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Rodrigo Barreno López**, con número de carné: **2009-15005** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO REFORZADO, EN BASE AL CÓDIGO ACI 307.**

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: **DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO REFORZADO, CON BASE EN EL CÓDIGO ACI 307.**



Licenciada Rosa Amelia Gonzalez Domínguez
Coordinadora de la Unidad de Lingüística

Cc. Archivo



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Eduardo Ramírez Saravia y del Jefe del Departamento de Estructuras, Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera, al trabajo de graduación del estudiante Rodrigo Barreno López, titulado **DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO REFORZADO, CON BASE EN EL CÓDIGO ACI 307**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco 

Guatemala, enero de 2014.

/bbdeb.

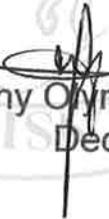
Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano 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 Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE CHIMENEAS INDUSTRIALES EN CONCRETO REFORZADO, CON BASE EN EL CÓDIGO ACI 307**, presentado por el estudiante universitario: **Rodrigo Barreno López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, enero de 2014

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre

In memoriam.

AGRADECIMIENTO A:

Ing. Eduardo Ramírez Saravia Por su dedicación y esfuerzo en la asesoría
brindada para la elaboración de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XI |
| GLOSARIO | XXI |
| RESUMEN..... | XXV |
| OBJETIVOS..... | XXVII |
| INTRODUCCIÓN | XXIX |
| | |
| 1. GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.1. ¿Qué son las chimeneas industriales?..... | 1 |
| 1.2. Antecedentes..... | 1 |
| 1.3. Clasificación de chimeneas | 4 |
| 1.4. Tipos de gases a evacuar..... | 5 |
| 1.5. Materiales de construcción | 8 |
| 1.5.1. Chimeneas de ladrillo | 8 |
| 1.5.2. Chimeneas de acero..... | 9 |
| 1.5.3. Chimeneas de concreto | 10 |
| 1.6. Partes de una chimenea..... | 11 |
| 1.6.1. Revestimiento | 11 |
| 1.6.1.1. Clasificación de revestimientos..... | 12 |
| 1.6.1.2. Revestimiento de ladrillo refractario..... | 13 |
| 1.6.1.3. Revestimiento de acero | 15 |
| 1.6.1.4. Otros materiales de revestimiento | 16 |
| 1.6.2. Ménsulas o braquetes | 16 |
| 1.6.3. Fuste..... | 17 |
| 1.6.4. Cimentación..... | 17 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2. | CONSIDERACIONES DE DISEÑO | 19 |
| 2.1. | Dimensionamiento y proporciones | 19 |
| 2.2. | Tipología básica constructiva de chimeneas de concreto reforzado | 22 |
| 2.3. | Cargas de diseño | 25 |
| 2.3.1. | Cargas por peso propio | 25 |
| 2.3.2. | Cargas por viento | 25 |
| 2.3.3. | Cargas por sismo | 27 |
| 2.3.4. | Cargas por temperatura | 28 |
| 2.4. | Aberturas..... | 29 |
| 2.4.1. | Entrada de humos | 29 |
| 2.4.2. | Puertas de limpieza..... | 30 |
| 2.5. | Deflexiones máximas | 30 |
| 2.6. | Cimentación | 30 |
| 2.6.1. | Estabilidad..... | 30 |
| 2.6.2. | Asentamientos diferenciales..... | 31 |
| 2.6.3. | Disposiciones típicas para la cimentación de chimeneas..... | 32 |
| 2.6.4. | Análisis y diseño de la cimentación..... | 32 |
| 3. | REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO ACI 307 | 35 |
| 3.1. | Materiales..... | 35 |
| 3.1.1. | Cemento..... | 35 |
| 3.1.2. | Agregados | 35 |
| 3.1.3. | Refuerzo..... | 36 |
| 3.2. | Requerimientos de construcción | 36 |
| 3.2.1. | Resistencia del concreto | 36 |
| 3.2.2. | Encofrado | 36 |
| 3.2.3. | Colocación del refuerzo..... | 37 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.2.4. | Colocación del concreto | 38 |
| 3.2.5. | Curado del concreto | 38 |
| 3.2.6. | Tolerancias de construcción | 38 |
| 3.3. | Criterio general de diseño..... | 39 |
| 3.3.1. | Espesor mínimo del fuste | 39 |
| 3.3.2. | Consideraciones de la cimentación | 40 |
| 3.4. | Consideraciones y requerimientos especiales de diseño | 40 |
| 3.4.1. | Refuerzo vertical..... | 40 |
| 3.4.2. | Refuerzo circunferencial | 41 |
| 3.4.3. | Refuerzo en las aberturas | 41 |
| 3.5. | Cálculo de las cargas de diseño..... | 45 |
| 3.5.1. | Carga sísmica..... | 45 |
| 3.5.2. | Cargas de viento..... | 49 |
| 3.5.3. | Esfuerzos térmicos | 51 |
| 3.5.4. | Combinación de cargas | 56 |
| 3.6. | Procedimiento de diseño | 57 |
| 3.6.1. | Diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión y temperatura..... | 57 |
| 3.6.1.1. | Método del ACI 307-08..... | 57 |
| 3.6.1.2. | Método del Dr. Wadi S. Rumman | 62 |
| 3.6.2. | Diseño del refuerzo circunferencial..... | 67 |
| 4. | EJEMPLO DE DISEÑO..... | 69 |
| 4.1. | Datos y dimensionamiento del modelo..... | 69 |
| 4.2. | Integración de cargas | 74 |
| 4.3. | Determinación de cargas y momentos por sismo..... | 80 |
| 4.3.1. | Cálculo del período de vibración y corte basal | 80 |
| 4.3.2. | Distribución vertical de fuerzas..... | 81 |
| 4.3.3. | Cálculo de los momentos por sismo | 84 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.4. | Diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión | 85 |
| 4.5. | Cálculo de los esfuerzos térmicos verticales..... | 101 |
| 4.5.1. | Velocidad del gas en las distintas secciones..... | 101 |
| 4.5.2. | Gradientes térmicos | 103 |
| 4.5.3. | Esfuerzos térmicos verticales..... | 105 |
| 4.5.4. | Modificaciones a $f'c$ y f_y para diseño del refuerzo vertical..... | 106 |
| 4.6. | Diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión y temperatura..... | 107 |
| 4.7. | Diseño del refuerzo circunferencial por viento | 116 |
| 4.7.1. | Cálculo de los momentos circunferenciales | 116 |
| 4.7.2. | Diseño del refuerzo | 117 |
| 4.8. | Diseño del refuerzo circunferencial por flexión y temperatura..... | 121 |
| 4.8.1. | Cálculo de los esfuerzos térmicos circunferenciales | 121 |
| 4.8.2. | Modificaciones a $f'c$ y f_y para diseño del refuerzo circunferencial | 123 |
| 4.8.3. | Diseño del refuerzo | 124 |
| 4.9. | Diseño del refuerzo en las aberturas..... | 126 |
| 4.9.1. | Abertura para la puerta de limpieza | 126 |
| 4.9.2. | Abertura para la entrada de humos..... | 129 |
| 4.10. | Diseño del refuerzo de las ménsulas | 132 |
| 4.11. | Diseño de la cimentación | 136 |
| 4.11.1. | Selección del tipo de cimentación | 136 |
| 4.11.2. | Chequeo contra volteo | 136 |
| 4.11.3. | Distribución de presiones bajo la cimentación, por cargas de servicio | 138 |

| | | |
|-----------------------|--|-----|
| 4.11.4. | Distribución de presiones bajo la cimentación, por cargas factoradas (para diseño en concreto por resistencia última)..... | 140 |
| 4.11.5. | Diseño del refuerzo de la cimentación..... | 142 |
| 4.12. | Detalles de construcción..... | 146 |
| 4.13. | Detalles de armado | 151 |
| CONCLUSIONES | | 157 |
| RECOMENDACIONES | | 159 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 161 |
| APÉNDICES | | 163 |
| ANEXOS | | 167 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Esquema básico de una chimenea industrial | 3 |
| 2. | Chimeneas de ducto simple y ductos múltiples..... | 5 |
| 3. | Chimenea industrial de ladrillo | 9 |
| 4. | Chimenea industrial de concreto armado..... | 10 |
| 5. | Clasificación de revestimientos | 13 |
| 6. | Colocación de revestimiento metálico | 15 |
| 7. | Revestimiento de ladrillo sobre ménsulas o braquetes | 17 |
| 8. | Chimenea típica de concreto armado..... | 18 |
| 9. | Pendiente del fuste de la chimenea | 19 |
| 10. | Chimenea de revestimiento de ladrillo y cámara ventilada | 24 |
| 11. | Vórtices de viento en chimenea | 26 |
| 12. | Esfuerzos térmicos en el muro de la chimenea..... | 29 |
| 13. | Cimentaciones típicas para chimeneas..... | 33 |
| 14. | Detalle de armado en las aberturas | 43 |
| 15. | Barras de amarre (<i>Tie bars</i>) en las aberturas | 44 |
| 16. | Análisis estático equivalente | 48 |
| 17. | Cálculo de T_x | 55 |
| 18. | Diagrama de esfuerzos | 59 |
| 19. | Diseño por resistencia última sin abertura ($\beta = 0^\circ$)..... | 63 |
| 20. | Diseño por resistencia última con abertura ($\beta = 10^\circ$) | 64 |
| 21. | Diseño por resistencia última con abertura ($\beta = 20^\circ$) | 65 |
| 22. | Diseño por resistencia última con abertura ($\beta = 30^\circ$) | 66 |
| 23. | Dimensiones del modelo a diseñar | 70 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 24. | Dimensiones de ménsula..... | 71 |
| 25. | Secciones de la chimenea | 74 |
| 26. | Diámetros para una sección x de la chimenea | 77 |
| 27. | Distribución vertical de fuerzas | 83 |
| 28. | Aberturas en la sección 1 de la chimenea | 88 |
| 29. | Armadura preliminar de la ménsula | 134 |
| 30. | Armadura final de ménsula | 135 |
| 31. | Solicitaciones en la cimentación | 137 |
| 32. | Distribución de presiones bajo la cimentación por cargas de servicio | 140 |
| 33. | Distribución de presiones bajo la cimentación por cargas factoradas | 142 |
| 34. | Elevación de la chimenea | 147 |
| 35. | Sección de la chimenea..... | 148 |
| 36. | Otros detalles..... | 149 |
| 37. | Detalles de anclaje del refuerzo del revestimiento..... | 150 |
| 38. | Armado de cimentación y ménsula | 151 |
| 39. | Armadura circunferencial y vertical de la chimenea..... | 152 |
| 40. | Armadura en la entrada de humos..... | 153 |
| 41. | Armadura en la puerta de limpieza | 154 |
| 42. | Especificaciones generales | 155 |

TABLAS

| | | |
|------|----------------------------------|----|
| I. | Calidad del aire según OMS | 7 |
| II. | Valor del parámetro Q..... | 60 |
| III. | Peso del fuste de concreto | 75 |
| IV. | Peso del revestimiento..... | 76 |
| V. | Pesos totales por sección | 79 |

| | | |
|--------|---|-----|
| VI. | Distribución vertical de fuerzas | 82 |
| VII. | Momentos por sismo para cada sección | 84 |
| VIII. | Datos para el diseño por flexo-compresión | 85 |
| IX. | Resumen de cálculo de cuantías verticales totales por flexo-compresión..... | 98 |
| X. | Armado del refuerzo vertical por flexo-compresión | 100 |
| XI. | Velocidad del gas en cada sección | 102 |
| XII. | Gradientes térmicos de cada sección | 103 |
| XIII. | Esfuerzos térmicos verticales por sección | 106 |
| XIV. | Modificaciones a $f'c$ y f_y para cada sección para diseño del refuerzo vertical..... | 107 |
| XV. | Resumen de cálculo de cuantía verticales totales por flexo-compresión y temperatura..... | 113 |
| XVI. | Armado del refuerzo vertical por flexo-compresión y | 115 |
| XVII. | Momentos circunferenciales por sección | 117 |
| XVIII. | Armado del refuerzo circunferencial por flexión | 121 |
| XIX. | Esfuerzos térmicos circunferenciales por sección..... | 122 |
| XX. | Modificaciones a $f'c$ y f_y para cada sección para diseño del refuerzo circunferencial | 123 |
| XXI. | Armado del refuerzo circunferencial por flexión y temperatura | 126 |
| XXII. | Refuerzo en la abertura para puerta de limpieza | 129 |
| XXIII. | Refuerzo adicional en la abertura para entrada de humos..... | 131 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|------------------------------------|--|
| h | Altura, en pies. |
| H | Altura de la chimenea, en pies. |
| h_x | Altura desde la base de la chimenea hasta la base de la sección x, en pies. |
| z | Altura sobre el nivel del suelo, en pies. |
| l | Ancho de la abertura en el fuste de la chimenea, en pies. |
| B | Ancho de la cimentación, en pies. |
| b_w | Ancho del alma, en pulg. |
| μ | Ángulo <i>mi</i> . |
| τ | Ángulo <i>tau</i> . |
| ψ | Ángulo <i>psi</i> . |
| A_s | Área de acero. |
| A_s^{máx} | Área de acero máxima. |
| A_s^{mín} | Área de acero mínimo. |
| a_{vr} | Área de la sección transversal de una varilla de acero de refuerzo, en pulg ² . |
| A_f | Área de refuerzo en una ménsula o cartela que resiste el momento mayorado, en pulg ² . |
| A_n | Área de refuerzo en una ménsula o cartela que resiste la fuerza de tracción N _{UC} , en pulg ² . |
| A_{vf} | Área de refuerzo por cortante por fricción, en pulg ² . |

| | |
|-----------------------|---|
| A_{sc} | Área de refuerzo principal de tracción en una ménsula o cartela, en pulg ² . |
| A_h | Área de refuerzo total para cortante paralelo al refuerzo principal de tracción en una ménsula o cartela, en pulg ² . |
| Btu | British thermal unit (unidad de energía inglesa). |
| c' | c para esfuerzo circunferencial. |
| q_{ad} | Capacidad de carga admisible del suelo, en kip/pie ² . |
| D | Carga muerta. |
| E | Carga sísmica. |
| P | Carga vertical. |
| P_u | Carga vertical factorada, en lb. |
| Q_m | Caudal másico del gas, en kg/s. |
| C_s | Coeficiente de conductividad térmica del aislante que rellena el espacio entre el revestimiento y el fuste de la chimenea, en Btu pulg/h pie ² °F. |
| C_c | Coeficiente de conductividad térmica del concreto, en Btu pulg/h pie ² °F. |
| C_b | Coeficiente de conductividad térmica del revestimiento, en Btu pulg/h pie ² °F. |
| α_{te} | Coeficiente de dilatación térmica del concreto del acero de refuerzo, 0,0000065/°F. |
| C_a | Coeficiente de sismicidad, según la tabla 16-Q del código UBC 1997. |
| C_v | Coeficiente de sismicidad, según la tabla 16-R del código UBC 1997. |
| K_o | Coeficiente de transmisión de calor de la superficie exterior del fuste de la chimenea hacia el aire circundante, en Btu/pie ² /h/°F. |

| | |
|------------------------|---|
| K_i | Coeficiente de transmisión de calor del gas a la superficie interior de revestimiento de la chimenea, si posee revestimiento, o a la superficie interior del fuste de la chimenea, si no lo posee, en Btu/pie ² /h/°F. |
| K_r | Coeficiente de transmisión de calor por radiación entre la superficie exterior del revestimiento y la superficie interior del fuste de la chimenea, en Btu/pie ² /h/°F. |
| K_s | Coeficiente de transmisión de calor por radiación entre la superficie exterior del revestimiento y la superficie interior del fuste de la chimenea, para chimenea con cámara ventilada en Btu/pie ² /h/°F. |
| J_x | Coeficiente numérico para el momento en el nivel x. |
| J | Coeficiente numérico para el momento en la base de la chimenea. |
| R | Coeficiente numérico representativo de la sobrerresistencia inherente y capacidad de ductilidad global de los sistemas resistentes a fuerzas laterales. |
| W_c | Consumo de combustible de la industria, en kg/s. |
| V | Corte basal, en lb. |
| ρ' | Cuantía de acero circunferencial exterior por unidad de altura. |
| ρ | Cuantía de acero de refuerzo. |
| ρ_b | Cuantía de acero de refuerzo balanceada. |
| ρ_{máx} | Cuantía de acero de refuerzo máxima. |
| ρ_{mín} | Cuantía de acero de refuerzo mínima. |
| ρ_t | Cuantía de acero vertical total. |
| ρ_o | Densidad de los humos en condiciones normales, en kg/Nm ³ . |

| | |
|-------------------------|---|
| ρ_{ck} | Densidad de masa del concreto, kip-s ² /pie ⁴ . |
| ρ_f | Densidad del fluido en el aparato medidor de tiro, en kg/m ³ . |
| Df | Desplante de cimentación. |
| d | Diámetro de la chimenea, en pies. |
| d_v | Diámetro de la varilla de acero de refuerzo, en pulg. |
| d(z) | Diámetro exterior del fuste de la chimenea, a una altura z, en pies. |
| d_{co} | Diámetro exterior del fuste de la chimenea, en pies. |
| d_{bo} | Diámetro exterior del revestimiento, en pies. |
| d(b) | Diámetro exterior en la base de la chimenea, en pies. |
| d(h) | Diámetro exterior en la punta de la chimenea, en pies. |
| d_{ci} | Diámetro interior del fuste de la chimenea, en pies. |
| d_{bi} | Diámetro interior del revestimiento, en pies. |
| d_s | Diámetro medio del espacio entre el revestimiento y el fuste de la chimenea, en pies. |
| d_c | Diámetro medio del fuste de la chimenea, en pies. |
| d_b | Diámetro medio del revestimiento, en pies. |
| d⁻(b) | Diámetro medio en la base de la chimenea, en pies. |
| @ | Distancia a centros entre las varillas de acero de refuerzo, en pulg. |
| K_e | E _s /f _y . |
| esp | Espaciamiento. |
| t_s | Espesor del aislante de relleno o de la cámara ventilada, en pulg. |
| t | Espesor del fuste de la chimenea, en pulg. |
| t(b) | Espesor del fuste en la base de la chimenea, en pies. |

| | |
|-------------------------|--|
| t(h) | Espesor del fuste en la punta de la chimenea, en pies. |
| t_b | Espesor del revestimiento, en pulg. |
| e | Excentricidad, en pies. |
| N_a | Factor de cercanía a la fuente, según la tabla 16-S del código UBC 1997. |
| N_v | Factor de cercanía a la fuente, según la tabla 16-T del código UBC 1997. |
| I_E | Factor de importancia para diseño por sismo. |
| I | Factor de importancia para diseño por viento. |
| G_r(z) | Factor de ráfaga para presión radial del viento, a una altura z. |
| Ø | Factor de reducción de resistencia. |
| Z | Factor de zona sísmica. |
| K_d | Factor direccional de viento. |
| β₁ | Factor que relaciona la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión de compresión con la profundidad del eje neutro. |
| V_u | Fuerza cortante mayorada en la sección, en lb. |
| F_h | Fuerza horizontal a un nivel designado como h, en lb. |
| N_{uc} | Fuerza horizontal de tracción mayorada que actúa simultáneamente con V _u , en la parte superior de una ménsula o cartela. |
| T_x | Gradiente térmico a través del fuste de la chimenea, en °F. |
| inf | Inferior. |
| l_d | Longitud de desarrollo, en pulg. |
| a_v | Luz de cortante, en pulg. |

| | |
|--------------------|---|
| $Y_{\text{máx}}$ | Máxima deflexión lateral de la punta de la chimenea, en mm. |
| ε_m | Máxima deformación unitaria a compresión del concreto. |
| f''_{CTC} | Máximo esfuerzo circunferencial en el concreto debido a la temperatura en el interior de la chimenea, en psi. |
| f_{STC} | Máximo esfuerzo en el refuerzo circunferencial en la cama exterior debido a la temperatura, en psi. |
| f_{STV} | Máximo esfuerzo en el refuerzo vertical en la cama exterior debido a la temperatura, en psi. |
| f''_{STV} | Máximo esfuerzo en el refuerzo vertical en la cama interior debido a la temperatura, en psi. |
| f''_{CTV} | Máximo esfuerzo vertical en el concreto dentro de la chimenea debido a la temperatura, en psi. |
| $M_i(z)$ | Máximo momento de flexión circunferencial debido a la presión radial del viento, a una altura z , en la cara exterior de la chimenea. |
| $M_i(z)$ | Máximo momento de flexión circunferencial debido a la presión radial del viento, a una altura z , en la cara interior de la chimenea. |
| α | Mitad del ángulo central subtendido por el eje neutro, en una sección transversal de la chimenea, en radianes. |
| γ | Mitad del ángulo central subtendido por las líneas centrales de dos aberturas en una sección transversal de la chimenea, en radianes. |
| β | Mitad del ángulo central subtendido por una abertura en la sección transversal de la chimenea, en rad. |

| | |
|-----------------------------|--|
| $f'c(c)$ | Modificación a $f'c$ por efectos térmicos para diseño del refuerzo circunferencial, en psi. |
| $f'c(v)$ | Modificación a $f'c$ por efectos térmicos para diseño del refuerzo vertical, en psi. |
| $f'y(c)$ | Modificación a f_y por efectos térmicos, para diseño del refuerzo circunferencial, en psi. |
| $f'y(v)$ | Modificación a f_y por efectos térmicos, para diseño del refuerzo vertical, en psi. |
| E_s | Módulo elástico del acero, en psi. |
| E_c | Módulo elástico del concreto. |
| M | Momento. |
| M_v | Momento de volteo. |
| M_x | Momento en cualquier nivel x, en lb-pie. |
| M_u | Momento factorado de la sección. |
| M_n | Momento nominal (momento resistente) de la sección. |
| M_r | Momento resistente al volteo. |
| n_1 | Número de aberturas completamente dentro de la zona de compresión. |
| Q | Parámetro de corrección del nivel de esfuerzo. |
| K | Parámetro para momento nominal. |
| K_1 | Parámetro para momento nominal. |
| K_2 | Parámetro para momento nominal. |
| K_2 | Parámetro para momento nominal. |
| K_3 | Parámetro para momento nominal. |
| Q_1 | Parámetro para momento nominal. |
| Q_2 | Parámetro para momento nominal. |
| \bar{R} | Parámetro para momento nominal. |
| t_c | Peralte de la cimentación, en pies. |

| | |
|-------------------------------------|--|
| d | Peralte efectivo, en pulg. |
| T | Período de la estructura, en segundos. |
| W | Peso. |
| γ_c | Peso específico del concreto. |
| γ_s | Peso específico del suelo. |
| $\bar{p}(z)$ | Presión debida a la velocidad media horaria del viento, a una altura z , en lb/pie ² . |
| $q_{m\acute{a}x}$ | Presión máxima debajo de la cimentación, en kip/pie ² . |
| $q_{m\acute{i}n}$ | Presión mínima debajo de la cimentación, en kip/pie ² . |
| $p_r(z)$ | Presión radial del viento a una altura z , en lb/pie ² . |
| W_h | Porción del peso de la chimenea que se asigna al nivel designado como h . |
| $r(z)$ | Radio medio de la chimenea a la altura z , en pies. |
| r | Radio promedio de la sección, en pies. |
| U_{ge} | Razón de gases producidos, en kg de gas/kg de combustible. |
| rec | Recubrimiento, en pulg. |
| γ_1' | Relación entre la cuantía de refuerzo circunferencial interior y exterior. |
| γ_1 | Relación entre la cuantía de refuerzo vertical interior y exterior. |
| c | Relación entre la distancia de la fibra extrema a compresión al eje neutro para esfuerzos verticales y el espesor del muro. |
| γ_2' | Relación entre la distancia desde la superficie interior del fuste de la chimenea al refuerzo circunferencial exterior y el espesor del fuste. |

| | |
|-------------|---|
| γ_2 | Relación entre la distancia desde la superficie interior del fuste de la chimenea al refuerzo vertical exterior y el espesor del fuste. |
| r_q | Relación entre la transmisión de calor a través del fuste de la chimenea y la transmisión de calor de a través del revestimiento para chimeneas con cámara ventilada. |
| n | Relación modular de elasticidad, E_s/E_c . |
| f'_c | Resistencia a compresión del concreto, en psi. |
| V_n | Resistencia a cortante nominal, en lb. |
| f_y | Resistencia de fluencia del acero de refuerzo, en psi. |
| U_c | Resistencia circunferencial requerida. |
| V_{cu} | Resistencia última al cortante proporcionada por el concreto, en psi. |
| U_v | Resistencia vertical requerida. |
| sup | Superior. |
| T_a | Temperatura absoluta del aire, en °K. |
| T_g | Temperatura absoluta del gas, en °K. |
| T_i | Temperatura de diseño del gas dentro de la chimenea, en °F. |
| T_o | Temperatura mínima de aire circundante de la chimenea, en °F. |
| h_w | Tiro en la base de la chimenea, en mm de agua. |
| V_r | $v(I^{0.5})$, en mph. |
| λ_1 | Valor igual a $\mu + \psi - \pi$, en radianes. |
| λ | Valor igual a $\tau - n_1\beta$, en radianes. |
| ω_t | Valor igual a $\rho_t f_y/f'_c$. |
| π | Valor igual a 3,1416. |
| vel | Velocidad. |

v Velocidad básica del viento, en mph.
V(z) Velocidad media horaria del viento, a una altura z, en pies/s.

GLOSARIO

| | |
|------------------------------|---|
| Chimenea | Estructura que encierra uno o varios ductos de evacuación de humos. |
| Combustible BTS | Combustible de bajo contenido de azufre. |
| Conductividad térmica | Propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. |
| Corte basal | Fuerza que transmite un sismo en la base de una estructura. |
| Cuantía de refuerzo | Porcentaje de acero, relativo al área de la sección transversal efectiva de concreto. |
| Ducto | Espacio por donde se da salida a los humos que son producto de la combustión de un combustible. |
| Eje neutro | Punto en el que las deformaciones unitarias en el acero y concreto son nulas. |
| Gradiente térmico | Gradiente obtenido a partir de una diferencia de temperatura entre las fibras extremas de una sección transversal del elemento. |

| | |
|----------------------------|--|
| Humos | Suspensión en el aire de partículas sólidas que resultan de la combustión incompleta de un combustible. |
| Junta de dilatación | Unión entre dos partes o miembros adyacentes de una estructura, que permite un movimiento relativo entre ambos debido a cambios térmicos o de otro tipo sin causarles daños o roturas. |
| Ménsula | Viga en voladizo de luz corta y de gran peralte. |
| Presión negativa | Presión menor a la presión atmosférica. |
| Presión positiva | Presión mayor a la presión atmosférica. |
| Refractario | Elemento o compuesto que es capaz de mantener sus propiedades físicas, químicas y mecánicas a altas temperaturas. |
| Revestimiento | Capa o cubierta que se utiliza para decorar o proteger una superficie. |
| Tiro | Diferencial de presión creado por la diferencia de densidades entre el gas de la chimenea y del aire exterior. |
| Tiro forzado | Tiro que se consigue mediante la aspiración de los humos, por medio de ventiladores. |

Tiro inducido

Tiro que se induce mediante la inyección de aire ambiente, en cualquier punto de la chimenea, impulsado por un ventilador.

Transmisión de calor

Es el paso de energía térmica, desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura.

Vórtice

Flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas.

RESUMEN

A lo largo del presente trabajo de investigación, se podrá encontrar información referente al diseño estructural de chimeneas industriales en concreto reforzado, con base en el código ACI 307-08, a través de cuatro capítulos. Es necesario aclarar, que para el análisis de carga sísmica, únicamente se abarcará el método estático equivalente, que se aplica para chimeneas de una altura no mayor a 60 metros (objeto de este trabajo).

Como una introducción al tema, en el primer capítulo se explica lo que es una chimenea industrial y sus partes, cuáles son sus antecedentes, los materiales de construcción y los tipos de gases que evacúan.

En el segundo capítulo se presentan todos aquellos aspectos que se deben considerar al momento de diseñar una chimenea industrial, por ejemplo; el dimensionamiento y proporción de la estructura, las cargas de diseño, y cimentación.

Ya en el tercer capítulo, se podrán encontrar los requerimientos de diseño y construcción de las chimeneas industriales que establece el código ACI 307-08, y con base en dichos requerimientos, en el cuarto capítulo, se realiza el diseño estructural de una chimenea industrial y sus respectivos detalles de armado y construcción.

OBJETIVOS

General

Elaborar un trabajo de investigación, donde se dé a conocer los requerimientos a considerar al momento de diseñar una chimenea industrial en concreto reforzado.

Específicos

1. Conocer las distintas partes que componen una chimenea industrial en concreto reforzado, y los requisitos de diseño y construcción de las mismas.
2. Identificar las cargas que se deben considerar en el diseño de una chimenea industrial de concreto reforzado.
3. Realizar el diseño estructural del modelo propuesto de una chimenea industrial en concreto reforzado, con base en el código ACI 307.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, como en muchas otras partes del mundo, el crecimiento industrial se ha venido incrementando en las últimas décadas, trayendo consigo la necesidad de construir chimeneas industriales para poder evacuar los gases originados en los diversos procesos de producción, a una altura tal que genere niveles de contaminación aceptable. Para poder construir chimeneas se necesita como material de construcción, concreto reforzado, pues este presenta altas resistencias a las acciones de sismo y al viento, que se vuelven más críticas mientras mayor sea la altura de la estructura.

Por tal motivo, se hace necesario para el ingeniero estructural, conocer el cómo diseñar una chimenea industrial en concreto reforzado. Este será el tema a tratar en el presente trabajo de investigación, en donde se podrán encontrar los requerimientos para diseño y construcción de chimeneas industriales de concreto reforzado de altura no mayor a los 60 metros, y, en base a dichos requerimientos, el análisis y diseño estructural de una chimenea. Se utilizarán varios códigos de diseño, tales como UBC 1997, ACI 318, ACI 307, siendo este último el más importante, ya que su aplicación es únicamente para este tipo de estructuras.

1. GENERALIDADES

1.1. ¿Qué son las chimeneas industriales?

Una chimenea industrial, es una estructura esbelta, en voladizo, de forma cilíndrica o tronco-cónica, que tiene la función de expulsar gases y humos industriales, resultantes de la combustión o de una reacción química, desde el nivel del terreno hasta determinada altura para su dispersión en la atmósfera, generando niveles de contaminación aceptables según las normas ambientales vigentes en el lugar (ver figura 1).

El grado de dilución y dispersión en la atmósfera de los gases emitidos por una chimenea, depende de varios factores: la altura y diámetro superior del ducto, la temperatura y velocidad de salida del efluente, condiciones meteorológicas y topográficas reinantes, entre otras.

1.2. Antecedentes

El hombre siempre ha estado en búsqueda de un sistema efectivo para evacuar gases indeseables, producto de la combustión. La forma más antigua de tal sistema, fue un pequeño respiradero. Con el paso de los años hubo un incremento del volumen de gases a ser manejados y como resultado los respiraderos fueron reemplazados por pequeñas chimeneas de ladrillo. El tamaño de tales chimeneas, continuó incrementándose hasta alcanzar los 0,50 metros de diámetro, las cuales comenzaron a ser conocidas como chimeneas industriales.

Hasta principios del siglo pasado, los materiales más populares para construir chimeneas industriales, fueron el ladrillo y acero. Las chimeneas crecieron en altura hasta alcanzar un punto en el que el ladrillo dejó de ser económico, y fue reemplazado por el acero. Mientras que en Alemania, la primer chimenea de concreto se construyó en 1876, las chimeneas de concreto reforzado fueron introducidas en el Reino Unido y Europa en 1907.

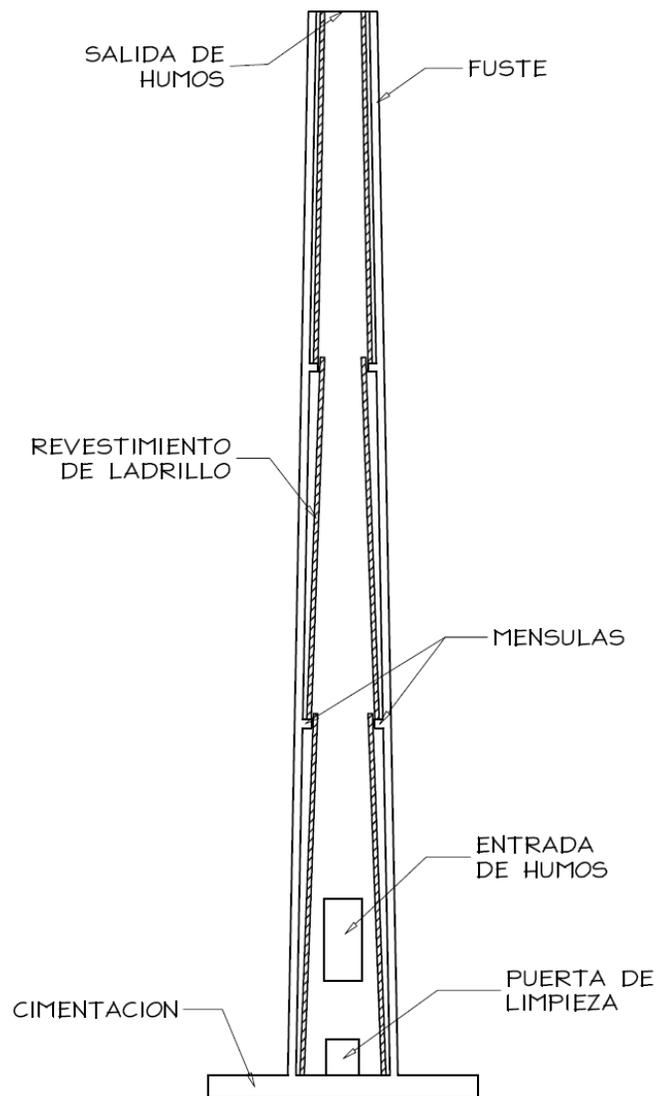
Las chimeneas de concreto reforzado, se habían construido desde 1900 en USA y la URSS, y en 1916 se construyó una chimenea alta de 165 metros en Japón. Hubo un marcado mejoramiento técnico en el campo de las chimeneas industriales entre 1928 y 1932, pero el concreto alcanzó su nivel predominante, como material de construcción, solo después que el problema de fisuración del concreto, debido a los gradientes térmicos, fue resuelto a inicios de 1950.

Las primeras chimeneas no contaban con revestimiento. El desarrollo de calderas y de la tecnología de combustibles, llevó a una disminución en la temperatura de los gases de combustión, lo que agravó los problemas de corrosión y forzó la introducción de revestimientos de protección. Inicialmente los revestimiento autoportantes de mampostería de ladrillo antiácido, respaldados por un medio aislante, fueron usados. Pero pronto se introdujo el ladrillo refractario en 1950. Como subsecuente desarrollo, tal revestimiento fue soportado por ménsulas, salientes del fuste de concreto. Sin embargo la penetración del gas a través del revestimiento, causó la corrosión del concreto, por lo que se utilizó la cámara ventilada entre el revestimiento y el concreto.

Los revestimientos de acero se han venido utilizando con mayor frecuencia en la actualidad, puesto que son impermeables a los gases y son más ligeros. Recientemente también se han utilizado los revestimientos

plásticos, en donde los gases tienen bajas temperaturas, lo que puede producir la corrosión en el acero.

Figura 1. **Esquema básico de una chimenea industrial**



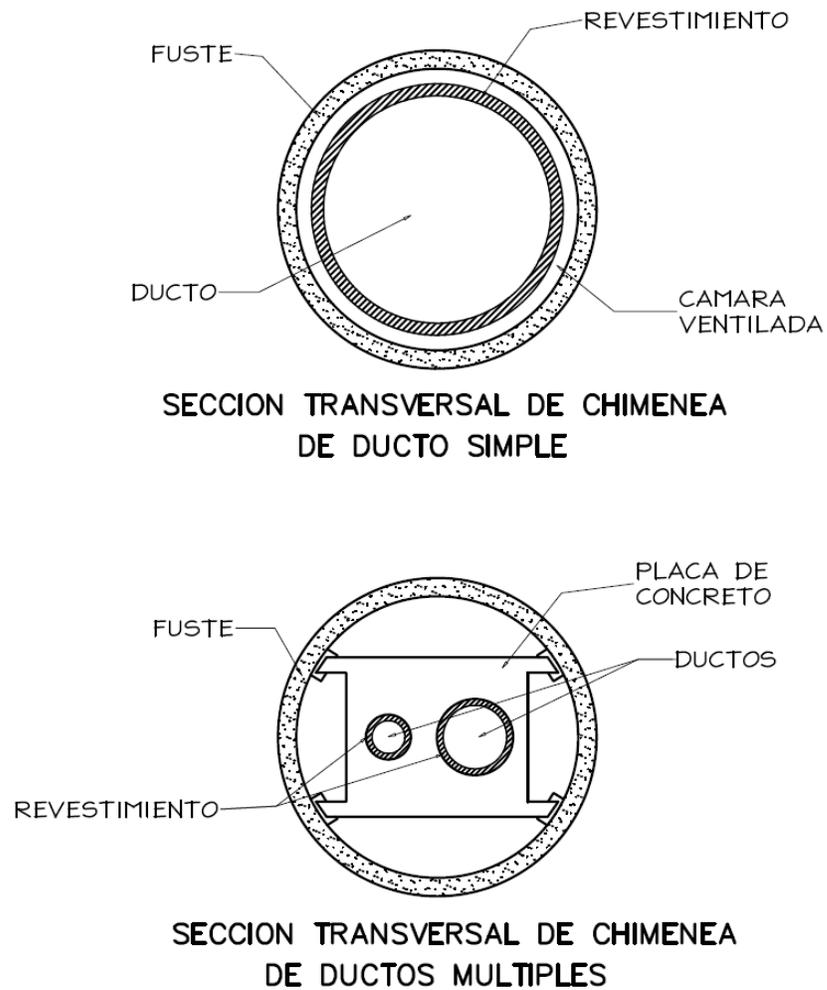
Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

1.3. Clasificación de chimeneas

Las chimeneas se pueden clasificar según varios criterios: según el método para conseguir una adecuada velocidad de salida de los gases, según el número de ductos dentro de la chimenea, según la manera en que resisten las fuerzas horizontales, y según el material de construcción.

- Por el método empleado para conseguir una velocidad adecuada de los gases, se les puede clasificar en chimeneas de tiro natural, chimeneas de tiro inducido y chimeneas de tiro forzado.
- Según el número de ductos independientes contenidos dentro de una misma envoltura estructural, en chimeneas de ducto simple y chimeneas de ductos múltiples (ver figura 2).
- Según la manera como se resisten las solicitaciones debidas a fuerzas horizontales, se las puede dividir en dos clases: autoportantes y no autoportantes. Autoportantes son aquellas, cuyo fuste resiste las solicitaciones debidas a viento o sismo. No autoportantes son aquellas que no pueden soportar dichas solicitaciones, y que requieren de una estructura auxiliar para resistirlas (acá se incluyen las chimeneas atirantadas).
- Por el material de construcción utilizado, se les puede clasificar en chimeneas de concreto reforzado, chimeneas de acero, chimeneas de ladrillo, entre otras.

Figura 2. **Chimeneas de ducto simple y ductos múltiples**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

1.4. Tipos de gases a evacuar

Es necesario conocer, qué tipos de gases van a ser evacuados por la chimenea, pues en función de estos se escogerá el diámetro y la altura de la chimenea, de manera que los niveles de contaminación previstos cumplan con

las normas de calidad del aire adoptadas en el lugar y proporcionar una adecuada velocidad de salida de los gases. Si la velocidad es muy baja existe la posibilidad de un descenso de los gases y consecuentemente un enfriamiento en el revestimiento y gas, seguido por una condensación ácida. Si la velocidad es muy alta puede que el revestimiento sufra daños por erosión.

Generalmente se trata de humos producto de la combustión de combustibles fósiles (carbón, derivados líquidos o gaseosos del petróleo), madera, en aire ambiente.

En el caso frecuente de combustibles líquidos (*fuel-oil, gasoil*) o gaseosos (hidrocarburos gaseosos o gas natural), estos humos se componen de:

- N_2 (dinitrógeno): procedente del aire comburente.
- CO_2 (dióxido de carbono) y H_2O (vapor): procedentes de la combustión de los combustibles orgánicos, junto con pequeñas cantidades provenientes de la propia composición del aire comburente.
- O_2 (oxígeno): procedente del aire comburente en exceso, respecto al necesario para una combustión estequiométrica.
- NO_x (óxidos de nitrógeno): si la temperatura alcanzada por la llama supera los 1 300 grados Celsius en alguna zona, la combinación del nitrógeno del aire (o de los compuestos nitrogenados presentes en el combustible) con el oxígeno, se realiza a velocidades apreciables, contaminando los humos con óxidos de nitrógeno en proporciones suficientes como para sobrepasar las normativas de ciertos países.
- SO_x (óxidos de azufre): algunos combustibles, especialmente los líquidos, contienen azufre en proporciones que pueden variar entre menos de un 1 por ciento (combustibles BTS) hasta algo más de un 5 por ciento (fueles pesados) que combinado con el oxígeno del aire, da lugar

a diferentes compuestos de azufre, todos ellos considerados como contaminantes por las administraciones de diferentes países.

- CO (monóxido de carbono): resultado de una combustión incompleta.
- Radicales libres, partículas sólidas (fundamentalmente de carbono) y otras, procedentes de impurezas en el combustible (metales pesados, por ejemplo), aunque todos ellos en muy pequeñas proporciones.

En la tabla I, se muestran los valores guía para la calidad del aire recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Tabla I. **Calidad del aire según OMS**

| Contaminante | Período | Unidad | Guía OMS |
|---|---------|-------------------|----------|
| NO ₂ (Dióxido de Nitrógeno) | 1 hr | µg/m ³ | 40 |
| | 1 año | µg/m ³ | 200 |
| SO ₂ (Dióxido de azufre) | 24 hrs | µg/m ³ | 20 |
| | 10 min | µg/m ³ | 500 |
| CO (monóxido de carbono) | 1 hr | ppm | 26 |
| | 8 hrs | ppm | 9 |
| MP ₁₀ (material particulado respirable de tamaño menor o igual a 10 micras) | 1 año | µg/m ³ | 20 |
| | 24 hrs | µg/m ³ | 50 |
| MP _{2,5} (material particulado respirable de tamaño menor o igual a 2,5 micras) | 1 año | µg/m ³ | 10 |
| | 24 hrs | µg/m ³ | 25 |

Fuente: www.who.int/phe/health_topics/AQG_spanish.pdf. Consulta: 5 de marzo de 2013.

1.5. Materiales de construcción

Son tres los materiales que más se han utilizado para la construcción de chimeneas industriales: ladrillo, acero, y concreto reforzado. En este trabajo se le dará mayor énfasis a estas últimas.

1.5.1. Chimeneas de ladrillo

Muy utilizadas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, estas chimeneas utilizaban como material básico al ladrillo cocido, que es un buen aislante térmico. Se caracterizaban por tener una altura y sección disminuyente de la base a la cúspide, provocando una depresión o tiro entre la entrada y la salida para establecer una corriente de aire, contribuyendo este tiro a la combustión. La sección interior era igualmente disminuyente, con tal de conservar una corriente ascendente, para vencer las corrientes de las masas de aire frío. La forma de la mayoría de las chimeneas de ladrillos era de sección circular, siendo la cuadrada menos frecuente y la octogonal particular de la zona levantina (particular de la costa mediterránea española).

La chimenea se dividía verticalmente en tramos de dimensión entre 4 y 5 metros en función de la altura. La disminución se realizaba por escalones, en el interior de la chimenea. Este proceso responde sencillamente al concepto mecánico de aumentar el ancho y la sección en la parte inferior por consideraciones de estabilidad y capacidad resistentes a las cargas gravitatorias acumuladas. Con esta economía de medios la rapidez de ejecución aumentaba. Por ejemplo, una chimenea de 25-30 metros se podía construir entre 30-50 días.

Figura 3. **Chimenea industrial de ladrillo**



Fuente: LÓPEZ, Pascual Clemente. Las Chimeneas Industriales en Almansa.
www.historiadealmansa.usuarios.tvalmansa.com. Consulta: 5 de marzo de 2013.

1.5.2. Chimeneas de acero

En la actualidad, ya no se construyen chimeneas industriales de ladrillo, puesto que se realizan con piezas prefabricadas tubulares de metal, mucho más económicas y sencillas de montar y desmontar.

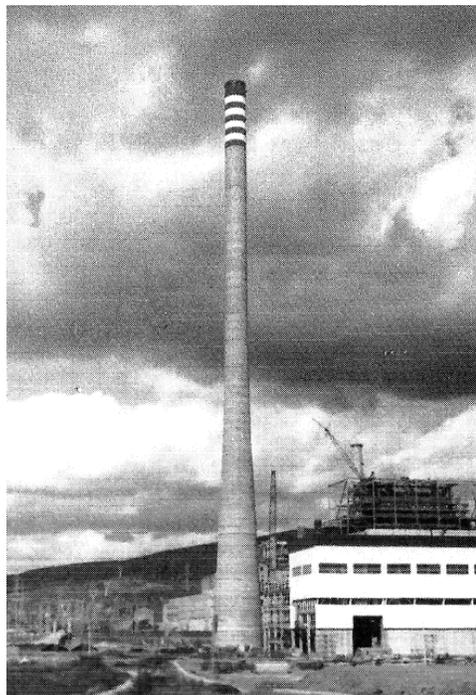
Sin embargo, estas tienen la desventaja que, al ser menos rígidas que el concreto, no pueden resistir de una forma eficiente las cargas horizontales a las que se ven solicitadas (viento, sismo y otras), de manera que no pueden

alcanzar grandes alturas. De hecho, muy pocas chimeneas de acero superan los 350 pies (106,68 m) de altura.

1.5.3. Chimeneas de concreto

La construcción de chimeneas en concreto armado, ha ido en aumento en las últimas décadas, debido principalmente a la creciente demanda en cuanto al control de contaminación del aire. Se han construido chimeneas de hasta 1 250 pies (380 metros) de altura, y hay muchas razones para creer que esta tendencia hacia la construcción de altas chimeneas continuará.

Figura 4. **Chimenea industrial de concreto armado**



Fuente: DEL SOLAR BERMEJO, José. Técnicas actuales para el proyecto y la construcción de las grandes chimeneas industriales. p. 6.

La creciente demanda de chimeneas junto con el uso en la construcción del encofrado deslizante, ha hecho hincapié en las ventajas de la construcción de concreto armado. Una ventaja principal en una chimenea de concreto armado, es que su resistencia a las vibraciones del viento es mucho mayor que la correspondiente a una chimenea de acero.

Mientras mayor sea la altura de la chimenea, muchos problemas estructurales, como la respuesta a las fuerzas sísmicas y de viento, se vuelve cada vez más crítica. Sin embargo, la disponibilidad de programas de computadora, hace posible analizar chimeneas para tales fuerzas y calcular tensiones para varias condiciones de carga de una manera rápida y económica.

1.6. Partes de una chimenea

En una chimenea industrial, se pueden distinguir cuatro partes fundamentales: revestimiento, ménsulas o braqueteres (utilizados para apoyo de revestimientos de tipo soportado), fuste, y la cimentación.

1.6.1. Revestimiento

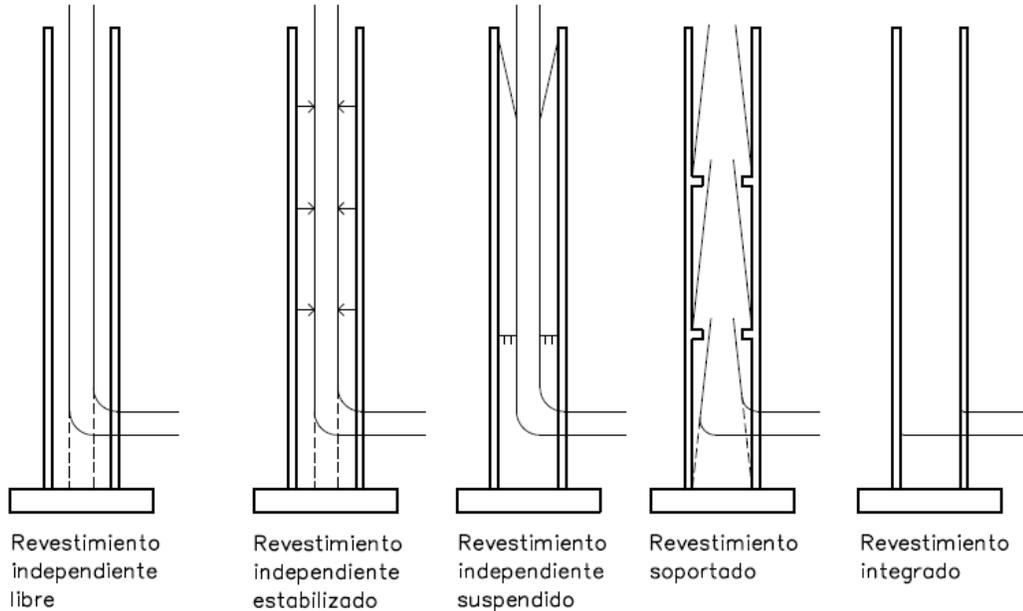
El revestimiento tiene como misión, la protección del concreto del fuste contra el ataque químico y térmico de los humos. Por ello su composición es a base de capas de materiales antiácidos y aislantes. Se coloca en todo lo alto de la chimenea y no se coloca adherido al concreto, sino que se deja un espacio libre entre ellos o este se rellena con un material aislante. El revestimiento generalmente es de ladrillo refractario, aunque en las últimas décadas se ha venido utilizando el revestimiento de acero y otros materiales.

1.6.1.1. Clasificación de revestimientos

Se distinguen tres clases de revestimientos: independientes, soportados e integrados. A su vez, los revestimientos independientes se clasifican en libres, estabilizados y suspendidos (ver figura 5).

- Revestimientos independientes. Son aquellos que no tienen ningún soporte vertical intermedio entre su base y su extremo superior.
- Revestimientos soportados. Los que están apoyados en soportes verticales intermedios entre su base y su extremo superior.
- Revestimientos integrados. Los que quedan soportados de manera continua, en virtud de que van adheridos al material que los circunda.
- Revestimientos libres. Aquellos cuyo peso descansa directamente sobre su base o sobre una sección cercana a ella, produciendo compresión en el revestimiento mismo, y a los cuales no se les provee de ningún medio de estabilización lateral. Usualmente se construyen de ladrillo, acero o plástico reforzado.
- Revestimientos estabilizados. Son aquellos cuyo peso descansa sobre su base o sobre una sección cercana a ella, produciendo compresión en el revestimiento mismo, pero cuya estabilidad lateral se consigue mediante apoyos dispuestos con ese fin. Usualmente se construyen de acero o de tabique.
- Revestimientos suspendidos. Aquellos que transmiten su peso al extremo superior del fuste de la chimenea, ya sea a través del revestimiento mismo, produciendo en él sollicitaciones de tensión, o bien en parte a través del revestimiento y en parte a través de cables de suspensión. Casi siempre son de acero.

Figura 5. **Clasificación de revestimientos**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

1.6.1.2. **Revestimiento de ladrillo refractario**

La mayoría de las chimeneas de concreto, se han construido utilizando el revestimiento de ladrillo refractario, de 4,5 pulgadas de espesor, apoyado en ménsulas, con un aislante de fibra de vidrio o sílice fundida entre el revestimiento y del fuste de concreto. Sin embargo, muchas chimeneas de este tipo, han mostrado signos de ataque ácido sobre la placa de concreto que es el resultado del paso de los gases calientes a través del revestimiento y su condensación sobre el concreto relativamente frío. Para evitar este problema, se puede optar por dejar una cámara ventilada entre el revestimiento y el fuste de concreto. Este tipo de revestimiento resulta eficiente para temperaturas de hasta 1 200 grados Celsius.

La vasta experiencia ha demostrado que el revestimiento de ladrillo soportado por ménsulas, se puede construir con espesores de 4,5 pulgadas (11,5 centímetros), formando cilindros, estructuralmente estables, de hasta 30 pies (9 metros) de altura, siempre y cuando el radio no sobrepase los 10 pies (3 metros). Así mismo, se le deberá proveer un refuerzo que consiste en bandas de hierro dulce (A-36), circunferenciales y verticales, de 75 milímetros x 6 milímetros y 50 milímetros x 5 milímetros, respectivamente, ambas espaciadas a 1 metro, y que se colocarán en la cara exterior del revestimiento (entre el fuste de la chimenea y el ladrillo).

En Guatemala se pueden encontrar diversas clases de ladrillos refractarios, cuyas propiedades son las siguientes:

- Densidad: 106 - 125 lb/pie³ (1 693 - 1 966 kg/m³)
- Resistencia a la compresión: 4 120 - 4 560 psi (288 - 320 kg/cm²)
- Conductividad térmica: 11,1 - 11,4 Btu pulg/h pie² °F
- Temperatura máxima de servicio: 2 408 - 3 038 °F (1 320 - 1 670 °C)

También se pueden encontrar, en el país, ladrillos refractarios aislantes, los cuales son más livianos que los ladrillos refractarios tradicionales, y con una conductividad térmica menor, lo que los hace más eficientes. Sin embargo, estos son más costosos que los tradicionales. Sus principales propiedades son:

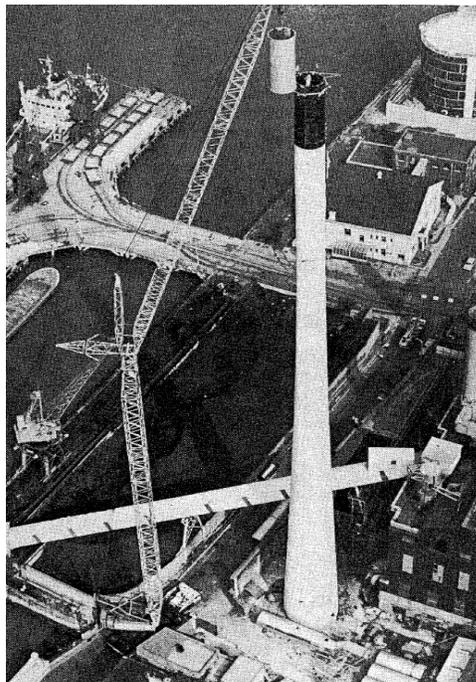
- Densidad: 465 - 1 314 kg/m³ (29 - 82 lb/pie³)
- Resistencia a la compresión: 110 - 1 000 psi (7 - 70 kg/cm²)
- Conductividad térmica: 0,80 - 8,40 Btu pulg/h pie² °F
- Temperatura máxima de servicio: 2 000 - 3 250 °F (1 100 - 1 790 °C)

Los morteros utilizados para este tipo de mampostería, generalmente son fabricados por las empresas que se dedican a la venta de ladrillos refractarios.

1.6.1.3. Revestimiento de acero

Muy utilizado en chimeneas, donde los gases alcanzan los 900 grados Fahrenheit (480 grados Celsius). El revestimiento de acero controla de mejor forma el ataque ácido del concreto pues es impermeable a los gases de combustión. Se utiliza en chimeneas de uno o varios ductos. Puede apoyarse en la parte superior de la chimenea, o en su base, o en plataformas intermedias. Es de peso ligero y alta resistencia, en comparación al ladrillo, haciéndolos superiores en donde la resistencia a los sismos es importante.

Figura 6. **Colocación de revestimiento metálico**



Fuente: PINFOLD, Geoffrey. Reinforced Concrete Chimneys and Towers. p. 151.

Sin embargo, entre las desventajas que presentan estos tipos de revestimientos, es que son susceptibles a la corrosión a bajas temperaturas, son susceptibles al pandeo debido a la presencia de aberturas y a los cambios de temperatura, y que cuando poseen grandes diámetros (mayores a 4,5 metros), el transporte se vuelve un problema. Además, generalmente se debe contar con grúas para la colocación de las secciones del revestimiento (ver figura 6).

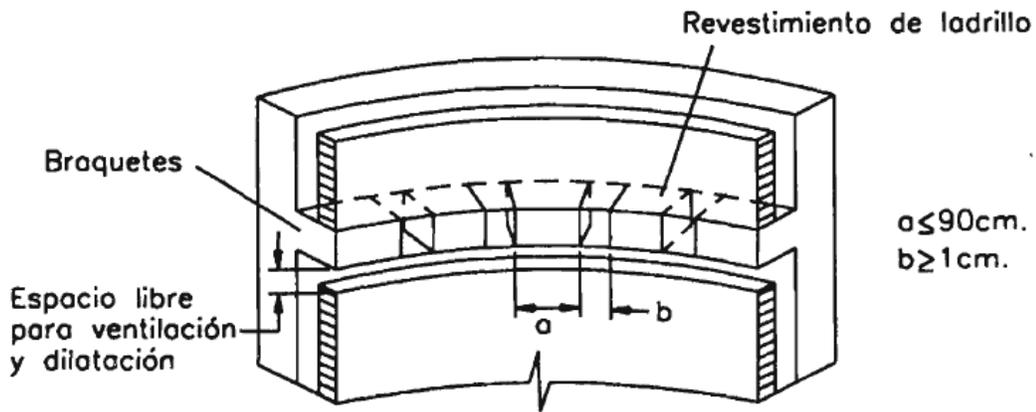
1.6.1.4. Otros materiales de revestimiento

Otros tipos de revestimiento, son los revestimientos de plástico reforzados con fibra de vidrio, el revestimiento de concreto independiente, y el revestimiento de ladrillo independiente. El revestimiento de plástico reforzado con fibra de vidrio y el revestimiento de ladrillo independiente, son especialmente útiles en instalaciones que utilizan depuradores, pues la presencia de estos causaría una condensación excesiva, debido a la baja temperatura de los gases (por debajo de 200 grados Celsius). Dicha condensación puede causar corrosión en revestimientos de acero.

1.6.2. Ménsulas o braquetes

Cuando se utiliza el revestimiento de ladrillo, este se apoya en ménsulas o braquetes como el mostrado en la figura 7. Las ménsulas o braquetes son anillos segmentados de concreto armado con una longitud no mayor que 90 centímetros, con una separación no menor a 1 centímetro, de modo que al dilatarse y contraerse no produzcan esfuerzos en la chimenea.

Figura 7. **Revestimiento de ladrillo sobre ménsulas o braquetes**



Fuente: HARMSEN, Teodoro E. Diseño de Estructuras de Concreto Armado. p. 530.

1.6.3. Fuste

Es el encargado de absorber y canalizar hasta la cimentación todos los esfuerzos debidos a su peso propio, peso del revestimiento y ménsulas, viento, esfuerzos sísmicos y térmicos.

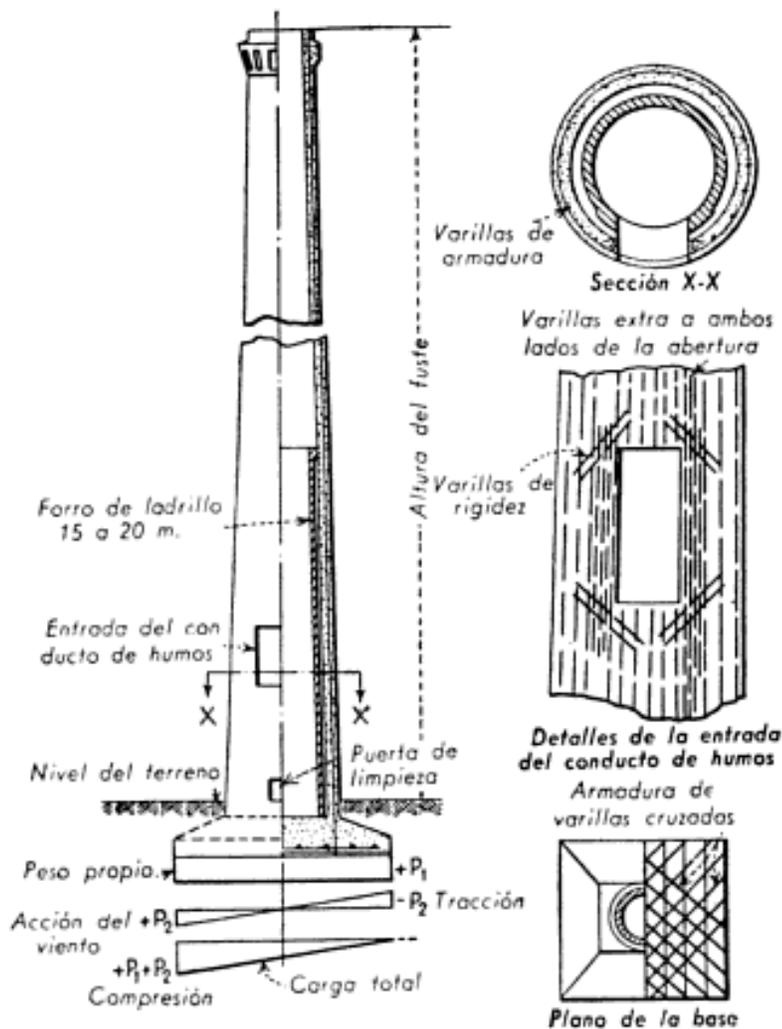
En el fuste, se disponen aberturas necesarias para entrada y salida del aire de ventilación, entradas de los canales de humos, puertas de acceso y orificios para instalación de lámparas de navegación aérea (balizas), aparatos para toma de muestras.

1.6.4. Cimentación

Es la encargada de recoger las acciones que le transmite el fuste y distribuir las en el terreno. Al ser estructuras de gran altura las cargas que llegan a la cimentación son elevadas, por lo que se requiere del uso de cimentaciones,

que sean capaces de transmitir al suelo dichas sollicitaciones sin que exista la falla por la capacidad de carga del suelo, y que los asentamientos que se generen no sean excesivos y pongan en peligro el funcionamiento de la estructura (ver figura 8).

Figura 8. Chimenea típica de concreto armado



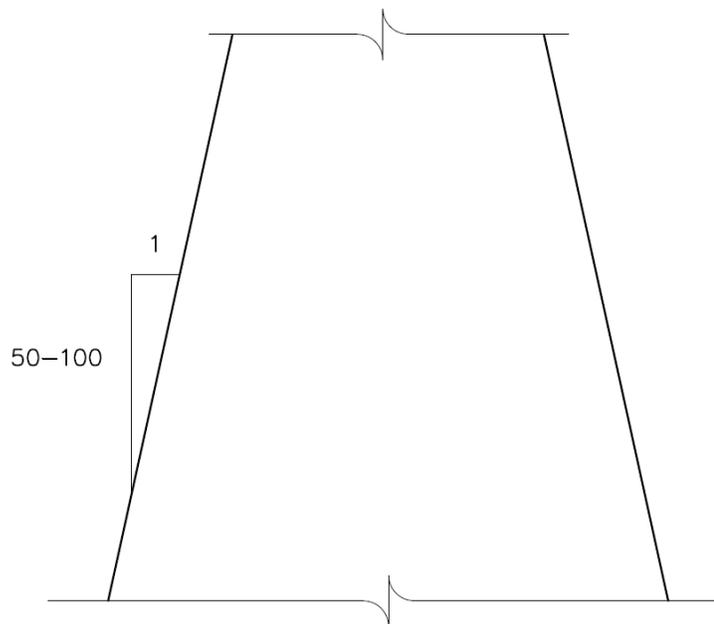
Fuente: GAFFERT, G.A. Centrales de vapor. p. 395.

2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

2.1. Dimensionamiento y proporciones

Generalmente las chimeneas son de forma tronco-cónica, con pendientes que varían de 1/50 a 1/100, siendo la más utilizada 1/75 (ver figura 9). Los diámetros exteriores pueden variar linealmente a lo largo de la chimenea para proporcionar una construcción más fácil, sin pérdida significativa en la economía.

Figura 9. **Pendiente del fuste de la chimenea**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

El diámetro y la altura en la parte superior de la chimenea, se definen en función de la velocidad de salida y dispersión de los gases requerida. Una velocidad entre 5 y 15 metros por segundo, se considera adecuada, mientras una velocidad de 10 metros por segundo, se considera muy conveniente. En tanto que el diámetro en la base es determinado por requerimientos estructurales. Por ejemplo, un diámetro pequeño en la base, puede crear problemas de diseño en la parte saliente de la cimentación y también puede causar tensiones elevadas en el fuste de concreto. La experiencia ha demostrado que, una relación entre la altura y el diámetro exterior de la base en el intervalo de 12-13, brindará buenas proporciones para el diseño tanto del fuste como para su cimentación.

Para calcular la altura de la chimenea de concreto reforzado, de una forma práctica y simplificada, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$H = \frac{h_w \rho_f}{46,4 \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1,08}{T_g} \right)}$$

Donde:

- H = altura de la chimenea (en metros)
- h_w = tiro en la base de la chimenea (en milímetros de agua)
- ρ_f = densidad del fluido en el aparato medidor de tiro (en kg/m^3)
- T_a = temperatura absoluta del aire (en grados Kelvin)
- T_g = temperatura absoluta del gas (en grados Kelvin)

Para el cálculo aproximado de la sección de paso de los humos, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$d_{bi} = \frac{4Q_m(273+T_i)}{273\pi \text{ vel } \rho_o}$$

Donde:

- d_{bi} = diámetro de la sección (en metros)
- Q_m = caudal másico del gas (kg/s)
- T_i = temperatura del gas (en grados Celsius)
- vel = velocidad de paso (en metros por segundo)
- ρ_o = densidad de los humos en condiciones normales ($\approx 1,3 \text{ kg/Nm}^3$, donde la N significa metros cúbico normales, condición que se da a una temperatura de 25 grados Celsius y una presión de 1 atmósfera)

Hay que observar que en la ecuación anterior, es necesario conocer el caudal másico del gas que circulará por la chimenea. Éste se calcula así:

$$Q_m = W_c U_{ge}$$

Donde:

- W_c = consumo de combustible por la industria (en kg/s)
- U_{ge} = razón de gases producidos (en kg gases/kg de combustilbe)

Por otra parte, el código ACI 307-08 recomienda un espesor mínimo en el fuste de 20 centímetros para chimeneas vaciadas en sitio y 17,50 centímetros para chimeneas con elementos prefabricados. Si el diámetro interno de la chimenea excede 28 pies (8,53 metros) el espesor se aumentará en 1/8 de pulgada (0,32 centímetros) por cada pie adicional (30,5 centímetros).

En este trabajo de investigación no se realizará el cálculo de la altura de la chimenea, ni de la sección del paso de los humos, ya que para ello, como se habrá notado, es necesaria la realización de un estudio previo y exhaustivo, con el que no se cuenta, y que no es el objetivo del trabajo.

2.2. Tipología básica constructiva de chimeneas de concreto reforzado

Para aquellas chimeneas donde los efectos térmicos necesitan ser considerados, existen cuatro tipos básicos de construcción, las cuales se enumeran a continuación:

- Chimeneas con revestimiento y un espacio de ventilación entre el revestimiento y el fuste de concreto.
- Chimeneas con revestimiento sin ventilación entre el revestimiento y el fuste de concreto.
- Chimeneas con revestimiento y una capa de aislante entre el revestimiento y el fuste de concreto.
- Chimeneas sin revestimiento. Recomendada cuando los gases a evacuar son de muy baja temperatura (por debajo de 200 grados Fahrenheit).

En los casos donde la temperatura supera los 200 grados Fahrenheit, la primera opción es la mejor, puesto que como su nombre lo indica, una cámara ventilada permite al aire circular en el espacio que hay entre el revestimiento y el fuste de concreto. Esto provoca que las pequeñas cantidades de los gases de combustión, que se escapan a través del revestimiento, sean barridos a la atmósfera y se les dé menos oportunidad de condensarse en la superficie fría del fuste de hormigón.

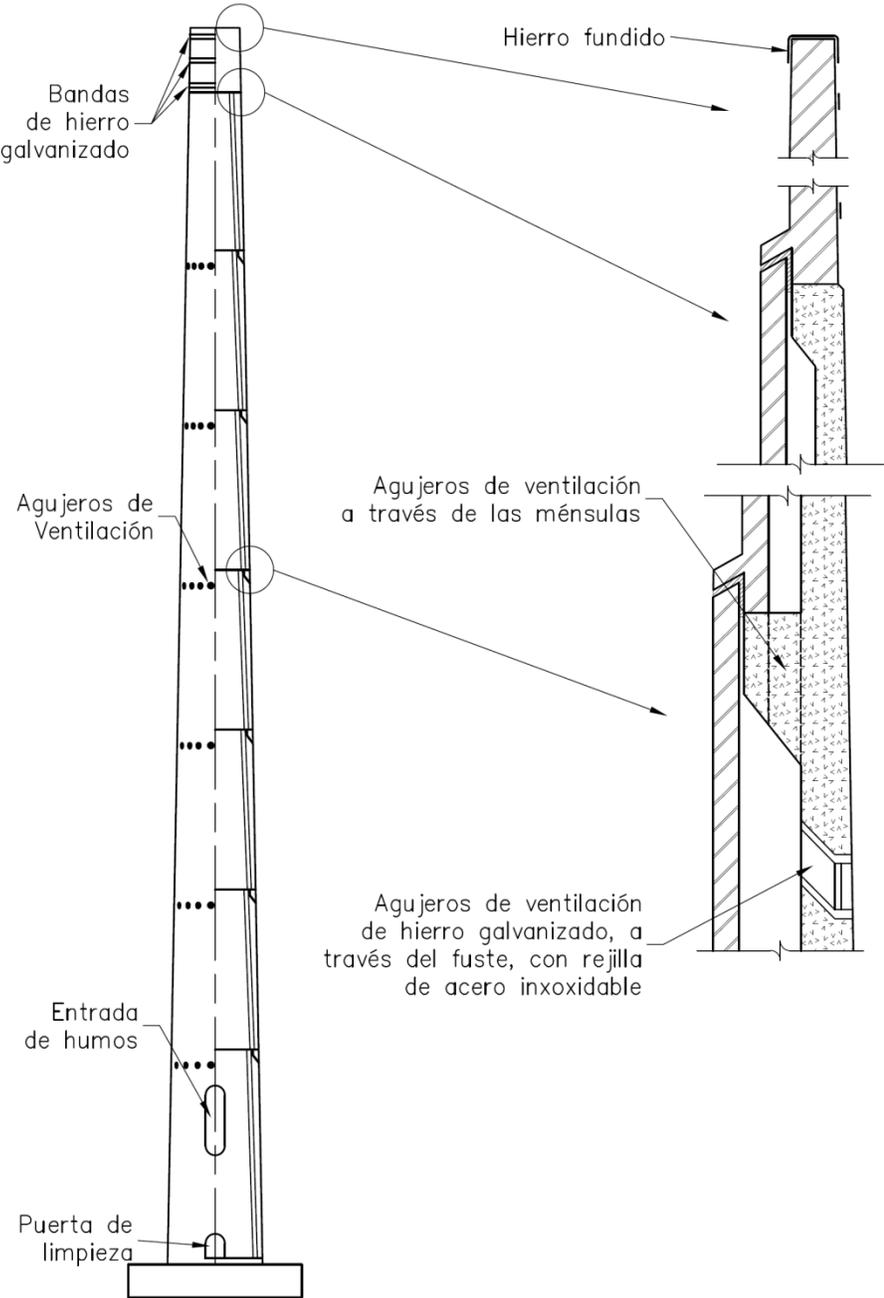
Cuando se utiliza revestimiento de ladrillo refractario, este normalmente es soportado por ménsulas, proyectadas desde el fuste, normalmente a cada 30 pies (9 metros), las cuales están agujeradas, para permitir al aire moverse verticalmente.

Comúnmente, debajo de cada ménsula, se proveen agujeros de ventilación a través del fuste de la chimenea. El área total de dichos agujeros, en pies cuadrados, debe ser numéricamente igual a $2/3$ del diámetro interior del revestimiento (o ducto) en la punta, en pies. Si los agujeros de ventilación son correctamente proporcionados, el aire del exterior se introduce en la cavidad a través de las filas de agujeros inferiores y es expulsado a través de las filas superiores, mientras que las filas intermedias equilibran la presión entre el aire en la cavidad y en el exterior.

La figura 10, muestra el detalle de una chimenea que posee un revestimiento de ladrillo apoyado sobre ménsulas y agujeros de ventilación. Estos agujeros están hechos de hierro galvanizado y poseen rejillas de acero inoxidable para evitar el ingreso de sólidos a la cavidad. En la figura también se pueden apreciar las juntas entre los ladrillos, que se rellenan con un empaque de lana de vidrio.

Además, en la figura 10, se puede observar el detalle del remate de la chimenea, el cual generalmente está hecho de ladrillo antiácido de 22,5 centímetros (9 pulgadas) de espesor y de una altura igual a $2/3$ del diámetro en la punta de la chimenea. El objeto de este remate, es minimizar el deterioro en la superficie del fuste de concreto exterior, debido al descenso de los gases de combustión corrosivos. Adicionalmente, en la parte superior del remate, se coloca una capa de hierro fundido alrededor de los ladrillos. Otros tipos de remates se presentan en la figura 44 (apendices).

Figura 10. **Chimenea de revestimiento de ladrillo y cámara ventilada**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

2.3. Cargas de diseño

El fuste de la chimenea deberá estar diseñado para resistir los esfuerzos resultantes del peso de la chimenea, el efecto de la temperatura, tanto vertical como circunferencialmente y el efecto del viento o de los movimientos sísmicos (el que sea mayor). En países como Guatemala, la condición de sismo es más crítica que la de viento y por ello el efecto de viento puede despreciarse (en lo que se refiere a flexión vertical).

2.3.1. Cargas por peso propio

Carga vertical aplicada sobre la estructura, que genera esfuerzos de compresión. Incluye el peso de la misma estructura, más la de los elementos permanentes. Aquí se puede mencionar:

- Peso del fuste de concreto
- Peso del revestimiento
- Peso de las ménsulas o braquetes
- Otras

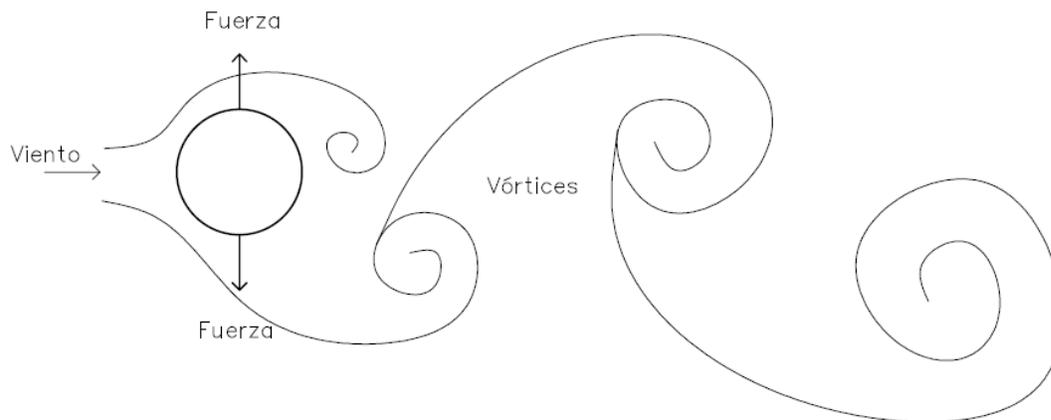
2.3.2. Cargas por viento

Una chimenea debe ser considerada, para efectos del cálculo de la resistencia mecánica a las acciones externas, como una viga empotrada en uno de sus extremos, sometida a esfuerzos de flexión. Una de las acciones mecánicas a tener en cuenta es la del viento.

Las fuerzas del viento sobre una chimenea de sección transversal circular, se deberán tomar como presiones estáticas horizontales resultantes sobre su

área proyectada (trapezoidal), actuando en la dirección del viento. A la vez, se deberá considerar que, en el sotavento, se genera una turbulencia, que se denomina vórtices de Kármán (ver figura 11). Cada vez que estos vórtices se desprenden de la chimenea, generan presiones y succiones asimétricas, provocando fuerzas que actúan alternativamente hacia un lado y otro, en dirección perpendicular al viento. Cuando la frecuencia del desprendimiento del vórtice está cerca de la frecuencia natural de la chimenea, se producirá resonancia, aumentando los esfuerzos de flexión en el fuste de la chimenea.

Figura 11. **Vórtices de viento en chimenea**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

A parte de la presión estática, se deberá analizar el efecto de la distribución de la presión radial del viento, que actúa alrededor de la circunferencia de la chimenea y que genera esfuerzos de flexión circunferencial.

2.3.3. Cargas por sismo

Los sismos son movimientos de la corteza terrestre originados por un constante reajuste geológico de la Tierra. Estos generan movimientos oscilatorios en las estructuras, donde la magnitud de los desplazamientos, depende principalmente de la rigidez de la estructura y de las características del suelo.

Los esfuerzos generados por los movimientos sísmicos, se estiman asumiendo un sistema de cargas laterales aplicado sobre la estructura, que lo representen lo más cercanamente posible, al fenómeno real.

Para el caso de las chimeneas, el análisis sísmico se puede efectuar a través de tres procedimientos: análisis en el tiempo, análisis espectral, análisis estático equivalente.

El análisis en el tiempo, consiste en analizar la estructura bajo una excitación similar a la registrada durante un sismo específico. Sin embargo, este método requiere del uso de computadoras y acelerogramas que representen las características propias de los sismos del lugar de ubicación de la chimenea. Como resultado de este análisis, se obtienen los esfuerzos y deformaciones de la estructura en función del tiempo.

Un análisis espectral, permite conocer las máximas sollicitaciones que se presentarán durante una acción sísmica. Los máximos esfuerzos y deformaciones de la estructura, se estiman con base en un espectro de aceleraciones.

El análisis estático equivalente, es un método mucho menos exacto que los anteriores y el nuevo código ACI 307-08 no lo recomienda, sin embargo, es útil para el diseño de chimeneas de hasta de 60 metros de altura, o bien para un prediseño de aquellas que superen esta altura.

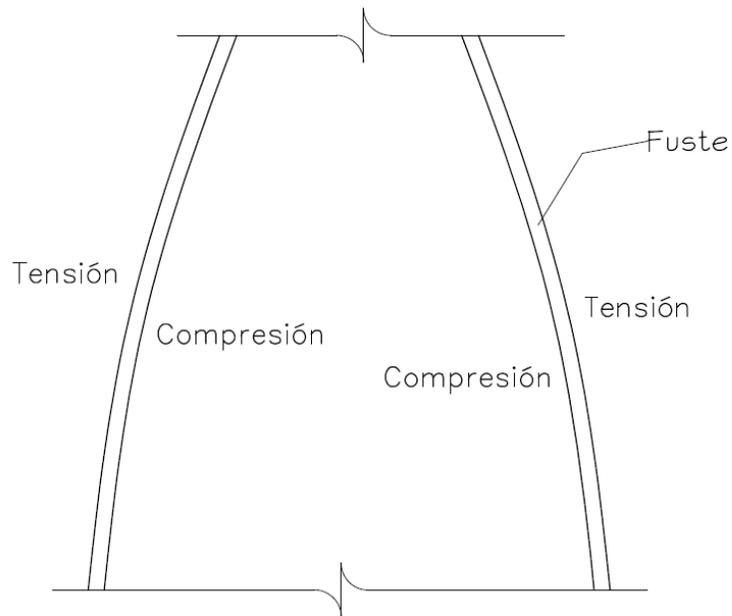
Para este trabajo de investigación, se utilizará este último método, el cual es presentado en el código ACI 307-79.

2.3.4. Cargas por temperatura

En las chimeneas industriales, se da la presencia de gradientes térmicos, los cuales producen esfuerzos de compresión en el interior del fuste y esfuerzos de tensión en la parte exterior (ver figura 12). Los gradientes térmicos se deben principalmente a que la diferencia de temperatura que hay entre el interior del revestimiento y el exterior del fuste, es menor que la diferencia que existe entre la temperatura del gas de combustión y la temperatura del aire ambiente, respectivamente. Otros factores que contribuyen a producir dichos gradientes, son la radiación solar y las conductividades térmicas de los materiales de construcción utilizados.

Adicionalmente, se debe mencionar, que la variación de temperatura a través de las paredes de la chimenea, reduce la resistencia del concreto y del acero. Por lo que esto se deberá considerar al momento de diseñar la chimenea para resistir esfuerzos de flexión, vertical y circunferencial, y los esfuerzos de compresión debidos al peso propio de la estructura.

Figura 12. **Esfuerzos térmicos en el muro de la chimenea**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

2.4. Aberturas

Según el ACI 307, en cualquier chimenea industrial, deberán proveerse adecuadas puertas de acceso en la base de la chimenea, además de una abertura para dar entrada a los humos.

2.4.1. Entrada de humos

Generalmente son de forma rectangular, con proporciones $1h : 2v$, o bien $1h : 4v$, y suelen poseer un área mayor en un 10 a 20 por ciento del área de la abertura de salida.

2.4.2. Puertas de limpieza

Generalmente se coloca diametralmente opuesta a la abertura de entrada de humos, en la parte baja de la chimenea. Sus dimensiones son aproximadamente 60 x 90 centímetros y se fabrican con hierro fundido. Estas permiten la extracción del hollín o de las cenizas volantes, así como la inspección del interior de la chimenea.

2.5. Deflexiones máximas

La máxima deflexión lateral de la parte superior de una chimenea antes de la aplicación de los factores de carga, según ACI 307-08, no excederá al valor dado por la siguiente ecuación:

$$Y_{\text{máx}} = 3,33 h$$

Donde: $Y_{\text{máx}}$: deflexión máxima (mm)
h : altura (m)

2.6. Cimentación

En el tema de la cimentación, hay dos factores que tienen mucha importancia: estabilidad y asentamientos. Además deberán conocerse las cimentaciones típicas para chimeneas, y la forma en que se analizan y diseñan.

2.6.1. Estabilidad

La estabilidad se refiere a la resistencia general de la cimentación a una falla por corte o por volteo. Las fallas por corte se previenen mediante la

elección de un valor soporte admisible seguro (se recomienda hacer un estudio de suelos). Como con el esfuerzo en el propio fuste, en una estructura sometida a cargas de gravedad y a cargas de volteo, debido al viento o sismo, el esfuerzo varía mucho con pequeños cambios en el movimiento de volteo. Por esta razón, se debe hacer un chequeo a la carga última, aplicando a la fuerza del viento un factor de carga de 1,4 a 1,6 (1,0 para sismo) o cualquier otro valor considerado para el diseño del fuste. Bajo estas condiciones teóricas, la base no debería tener volteo y el suelo no debería fallar por corte.

El factor de seguridad contra el volteo, debe ser por lo menos 1,5 bajo la carga última de viento o sismo, y la máxima presión soporte bajo la cimentación no debería exceder un 20 a 30 por ciento a la presión soporte admisible bajo la carga de servicio de viento o sismo.

2.6.2. Asentamientos diferenciales

Tanto las chimeneas como las torres son más susceptibles a los asentamientos diferenciales que muchas otras estructuras. Esto tiene una doble razón. En primer lugar, el ancho de la cimentación, es pequeña en relación a la altura, de modo que la desviación de la punta puede ser 10 veces la cantidad del asentamiento diferencial. En segundo lugar, cualquier inclinación aumenta la presión soporte bajo el lado de la base que se ha asentado más y así causa que se asiente aún más con respecto al lado opuesto.

El pilotaje es usado a menudo para chimeneas en situaciones donde otras estructuras no requieren este tipo de cimentación. La razón para esto, es que los movimientos diferenciales son más críticos, como se describió anteriormente. El grupo de pilotes está diseñado como un todo, con un esfuerzo en pilas individuales proporcionales a su distancia desde el eje neutro.

2.6.3. Disposiciones típicas para la cimentación de chimeneas

La figura 13, muestra seis disposiciones típicas, para la cimentación de chimeneas, de losas planas y de tipo anular. Las cimentaciones a, b y c son del tipo de losa plana, donde la de tipo a es la más común para chimeneas de altura pequeña o mediana, y consiste en una losa plana trabajando a flexión. El tipo b y c son versiones más sofisticadas que la versión a, ya que unos diafragmas rígidos son usados para transmitir la carga a una, comparativamente delgada losa de soporte con espacios entre los diafragmas y a veces una viga anular externa. En estructuras grandes, una losa superior podría ser usada para soportar la acción de los diafragmas.

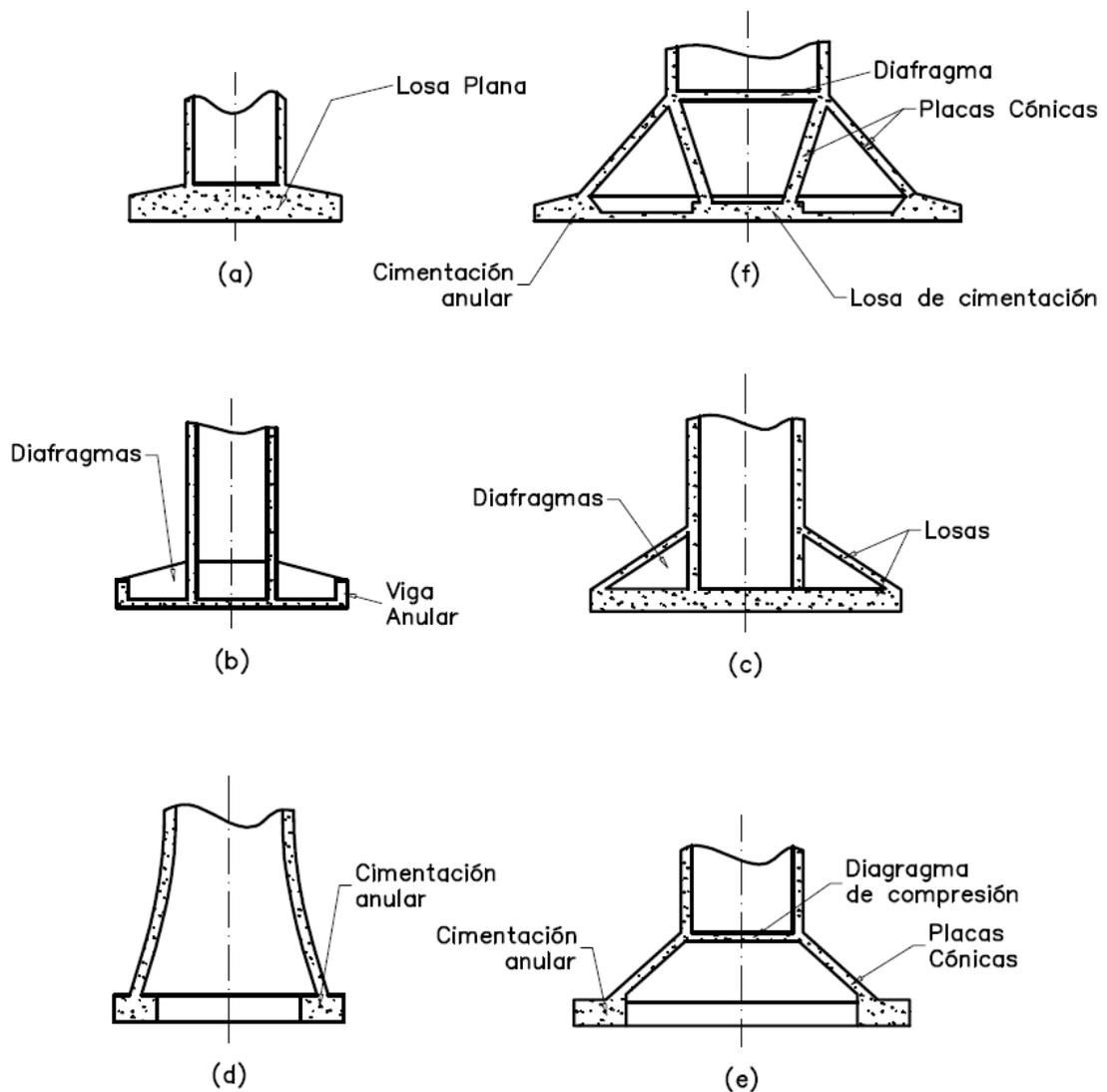
Los tipos d y e son dos tipos de cimentación anular. Estos son económicos, donde las presiones soporte admisibles son altas, sin embargo requieren una amplia base para dar una adecuada provisión contra la inclinación y volteo. En el tipo e una placa cónica lleva la carga del muro hacia un anillo de gran diámetro. La cimentación tipo f es una combinación de losa y cimentación anular. Un par de placas cónicas llevan una parte de la carga del fuste a la losa base y la otra parte hacia anillo externo.

2.6.4. Análisis y diseño de la cimentación

Cuando se trata de una cimentación tipo losa plana, la interacción suelo-estructura afecta la distribución de la presión entre la cara inferior de la cimentación y el suelo soportante. En la mayoría de los casos, se asume que dicha distribución varía linealmente, y que la cara inferior de la cimentación permanece plana. Además se asume que las secciones críticas para momento flexionante y cortante por flexión, se encuentran normalmente en la cara exterior del fuste de la chimenea. El refuerzo para resistir dichas solicitaciones

se coloca en la cara inferior de la cimentación. Generalmente en la cara superior de la misma, se coloca refuerzo por retracción y temperatura, a manera de evitar la formación de grietas.

Figura 13. Cimentaciones típicas para chimeneas



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

3. REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO ACI 307

A continuación se presentan los requerimientos del Código ACI 307-08 en cuanto a diseño y construcción de chimeneas industriales de concreto reforzado.

3.1. Materiales

Todos los materiales y los ensayos de los mismos deberán estar de acuerdo con los requisitos del código ACI 318 salvo que se especifique de otro modo.

3.1.1. Cemento

La misma marca y tipo de cemento se utilizará en toda la construcción de la chimenea. El cemento utilizado deberán satisfacer los requisitos para tipos I, II, III, o V de la Norma ASTM C150, o el tipo IS o IP de la Norma ASTM C595.

3.1.2. Agregados

Los agregados de concreto deberán cumplir con la Norma ASTM C33. Además, el tamaño máximo del agregado grueso no será mayor que $1/8$ de la dimensión menor entre las caras interiores de la formaleta, ni mayor a $1/2$ de la distancia libre mínima entre las barras de refuerzo.

3.1.3. Refuerzo

El refuerzo debe cumplir con ASTM A615/A615M, A996/A996M, o A706/A706M. Otro refuerzo con un fy especificado superior a 60 000 libras por pulgada cuadrada, se permitirá siempre y cuando la deformación por tracción última sea mayor o igual a 0,07 (gráfica esfuerzo-deformación por tracción).

3.2. Requerimientos de construcción

La calidad del concreto, los métodos de determinación de la resistencia del concreto, las pruebas *in situ*, las proporciones y la consistencia del concreto, la mezcla y colocación, y los encofrados y detalles de la construcción, deberán estar de acuerdo con los requisitos del código ACI 318, en donde sean aplicables, salvo cuando se especifique de otro modo.

3.2.1. Resistencia del concreto

La resistencia especificada a compresión del concreto, no será menor de 3 000 libras por pulgada cuadrada (210 kilogramos por centímetro cuadrado) a los 28 días.

3.2.2. Encofrado

El encofrado para el fuste de la chimenea, deberá estar hecho de metal, madera, u otros materiales adecuados. Si se utilizan encofrados de madera sin forrar, deberán ser de un material seleccionado con juntas machihembradas y deberán mantenerse continuamente húmedos para evitar la contracción y alabeo debidos a la exposición a los elementos. Se puede utilizar un aceite para encofrados que no manche, pero no se debe emplear aceite si la chimenea ha

de pintarse. El encofrado deberá estar suficientemente apretado para evitar fugas de mortero.

No se aplicará ninguna carga sobre la estructura de concreto, hasta que la parte de la estructura haya alcanzado suficiente resistencia para soportar con seguridad el peso y las cargas colocadas sobre la misma.

El encofrado se removerá de manera tal que garantice la seguridad de la estructura. Se permite retirar el encofrado después de que el concreto endurecido tenga una resistencia suficiente para mantener su forma sin daño y para apoyar con seguridad todas las cargas sobre el mismo, incluyendo las cargas de construcción temporales. No se permite el amarre entre la parte interior y exterior del encofrado del fuste de la chimenea.

Las juntas de construcción, deberán estar debidamente preparadas para facilitar la unión. Como requisito mínimo, toda la lechada y el material suelto serán eliminados.

3.2.3. Colocación del refuerzo

El refuerzo circunferencial, se colocará alrededor del exterior, y asegurado a las barras de refuerzo vertical. Todas las barras de refuerzo deberán amarrarse a intervalos de no más de 2 pies (60 centímetros).

Para el refuerzo en las chimeneas de colado *in situ*, el recubrimiento de concreto mínimo será de 2 pulgadas. Para el refuerzo en elementos prefabricados, elaborados bajo condiciones controladas de plantas, el recubrimiento de concreto mínimo será de 1,5 pulgadas.

3.2.4. Colocación del concreto

La colocación del concreto de colado *in situ* deberá ser conforme al ACI 318, y se colocará en capas de no más de 16 pulgadas (42 centímetros). No se usarán juntas verticales de construcción para chimeneas de colado *in situ*. Cuando se utilicen juntas de construcción horizontales para concreto de colado *in situ* y concreto prefabricado, estas estarán espaciadas uniformemente a lo largo de la altura del fuste de la chimenea.

3.2.5. Curado del concreto

Inmediatamente después que el encofrado ha sido removido, se iniciarán todos los acabados necesarios del concreto. Tan pronto como el acabado se haya completado, ambas caras de concreto se deberán revestir con un compuesto de curado con membrana u otro método aprobado por la licencia de diseño profesional. El compuesto deberá cumplir con las Normas ASTM C309 y deberá aplicarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Si han de aplicarse revestimientos al concreto, el compuesto de curado deberá ser de un tipo compatible con estos revestimientos.

3.2.6. Tolerancias de construcción

El fuste de la chimenea se construirá dentro de los límites de tolerancia establecidos en cuanto al alineamiento vertical, diámetro y espesor de la pared. Estos se explican a continuación:

- Alineación vertical del punto central: el alineamiento vertical del punto central del fuste, no debe variar a partir de su eje teórico por más de 0,001 veces la altura del fuste, o 1 pulgada, lo que sea mayor. A nivel

local, el punto central real del fuste. no deberá cambiar horizontalmente por más de 1 pulgada por cada 10 pies de elevación vertical.

- **Diámetro:** la medida del diámetro exterior del fuste en cualquier sección, no deben variar con respecto al diámetro especificado por más de 1 pulgada más 0,01 veces el diámetro teórico.
- **Espesor de las paredes:** el espesor de pared medido, no debe variar del espesor de pared especificado por más de -1/4 de pulgada, +1/2 pulgada para paredes de 10 pulgadas de espesor o menos, o por más de -1/2 pulgada para muros de más de 10 pulgadas de espesor. La medición del espesor de pared, se define como el promedio de al menos cuatro mediciones tomadas con una separación uniforme sobre un arco de 60 grados. Una tolerancia negativa disminuye el espesor total, y una tolerancia positiva aumenta el espesor total.

3.3. Criterio general de diseño

El fuste de la chimenea se diseñará para los efectos de la gravedad, la temperatura y el viento o sismo. Las combinaciones de carga a utilizar, serán distintas a las establecidas por el ACI 318.

3.3.1. Espesor mínimo del fuste

El fuste de la chimenea no deberá ser inferior a 8 pulgadas de espesor para concreto de colado *in situ*, ni menor a 7 pulgadas de espesor cuando se utilice concreto prefabricado. Si el diámetro interno de la chimenea excede 28 pies (8,53 metros) el espesor se aumentará en 1/8 de pulgada por pie adicional.

Alrededor de las aberturas, el espesor será por lo menos $1/24$ de la altura de la abertura y se extenderá alrededor de la abertura $1/2$ de la altura de la abertura en todos los lados.

3.3.2. Consideraciones de la cimentación

La máxima presión soporte para la cimentación, se establecerá utilizando cargas de servicio de la chimenea. La cimentación se diseñará de acuerdo a los requerimientos del ACI 318.

El ACI 307, establece que, al momento de diseñar la cimentación de la chimenea, se deberá chequear que esta no se vea sometida a volteo. El factor mínimo de seguridad contra el volteo, será de 1,50, utilizando las cargas de servicio.

3.4. Consideraciones y requerimientos especiales de diseño

Al diseñar una chimenea industrial de concreto reforzado, se debe conocer ciertos requerimientos especiales, en cuanto a la armadura de refuerzo. Estos se explican a continuación.

3.4.1. Refuerzo vertical

La cuantía de refuerzo vertical, no será menor que 0,25 por ciento (0,0025). El acero se dispondrá en dos capas, la exterior contará con al menos el 50 por ciento del refuerzo total y estará constituida por varillas núm.4, como mínimo, con espaciamiento centro a centro menor o igual que 12 pulgadas. La capa interior también estará constituida por varillas iguales o mayores que la núm.4 pero con espaciamiento mínimo de 24 pulgadas.

3.4.2. Refuerzo circunferencial

La cuantía de acero circunferencial, no será menor que 0,20 por ciento (0,0020). Se dispone en dos capas, exterior e interior, la cantidad mínima de refuerzo en cada cara será de 0,10 por ciento (0,0010). El refuerzo circunferencial exterior tendrá un espaciamiento máximo igual al espesor de la pared o 12 pulgadas, el que sea menor. El espaciamiento máximo del refuerzo circunferencial interior será de 12 pulgadas. El refuerzo circunferencial estará constituido por varillas iguales o mayores que la núm.3.

En el tramo limitado por el extremo superior de la chimenea, y una sección ubicada a $0,2d(h)$ de él o 7,50 pies, el que sea mayor, se proveerá al menos el doble de la cantidad de refuerzo circunferencial requerido por el cálculo, pero no será menor que 0,20 por ciento del área de concreto en cada cara. La separación máxima entre el acero circunferencial en esta zona, se limita a la mitad del espesor de pared, pero no excederá a 6 pulgadas. El término $d(h)$ representa el diámetro exterior en el extremo superior de la chimenea.

3.4.3. Refuerzo en las aberturas

Además del refuerzo determinado por diseño, un refuerzo adicional, se proveerá a los lados, arriba, abajo, y las esquinas de todas las aberturas. Todos los refuerzos adicionales se extenderán más allá de la abertura como mínimo una distancia igual a la longitud de desarrollo (ver figura 14).

A ambos lados de las aberturas, se colocará refuerzo vertical, cuya área será por lo menos igual a la mitad del acero interrumpido por la abertura. El refuerzo adicional, se coloca dentro de una distancia no superior a tres veces el espesor de la pared a menos que sea determinado por un análisis detallado. Si

el refuerzo vertical adicional no se coloca en la misma capa del refuerzo exterior e interior, se colocarán barras de amarre (*tie bars*), para amarrar el refuerzo vertical adicional, con espaciamiento máximo horizontal de 12 pulgadas y un espaciamiento máximo vertical de 24 pulgadas (ver figura 15).

Encima y debajo de las aberturas, se colocará el refuerzo adicional, el cual tendrá un área por lo menos igual a la mitad del área del refuerzo circunferencial interrumpido, pero no será menor que al área dada por:

$$A_s = \frac{0,06 f'_c t (l)}{f_y}$$

Donde:

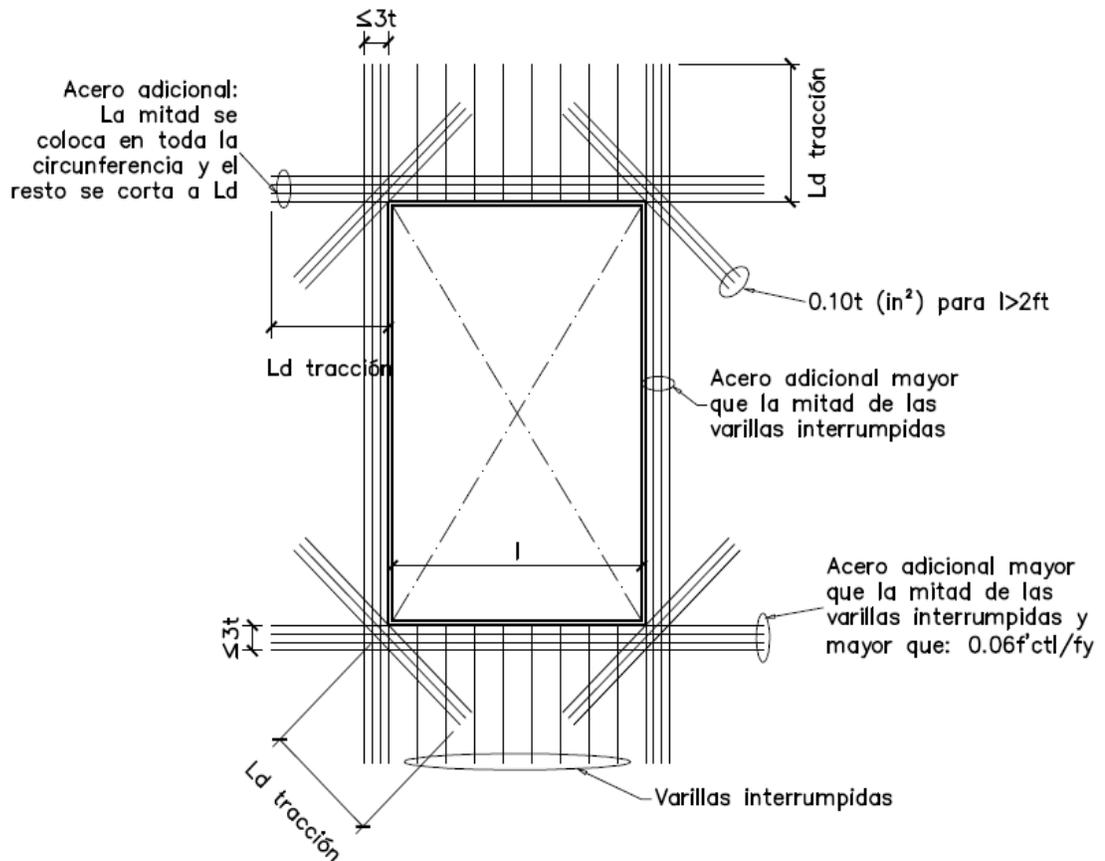
- As = área de acero circunferencial adicional, en pulg²
- f'c = resistencia a compresión del concreto, en psi
- t = espesor del muro en la abertura, en pulg
- l = ancho de la abertura, en pulg
- fy = resistencia a la fluencia del acero, en psi

Para aberturas de más de 2 pies (60 centímetros) de ancho, se colocarán en cada esquina barras diagonales de refuerzo, con un área total de sección transversal en pulgadas cuadradas, no menor de 1/10 del espesor del muro, en pulgadas. Para aberturas de ancho 2 pies (60 centímetros) o menor, un mínimo de dos barras de refuerzo núm. 5 será colocada diagonalmente en cada esquina de la abertura.

Se proveerán barras de amarre entre el refuerzo exterior e interior alrededor del perímetro de las aberturas, donde el refuerzo es interrumpido y en

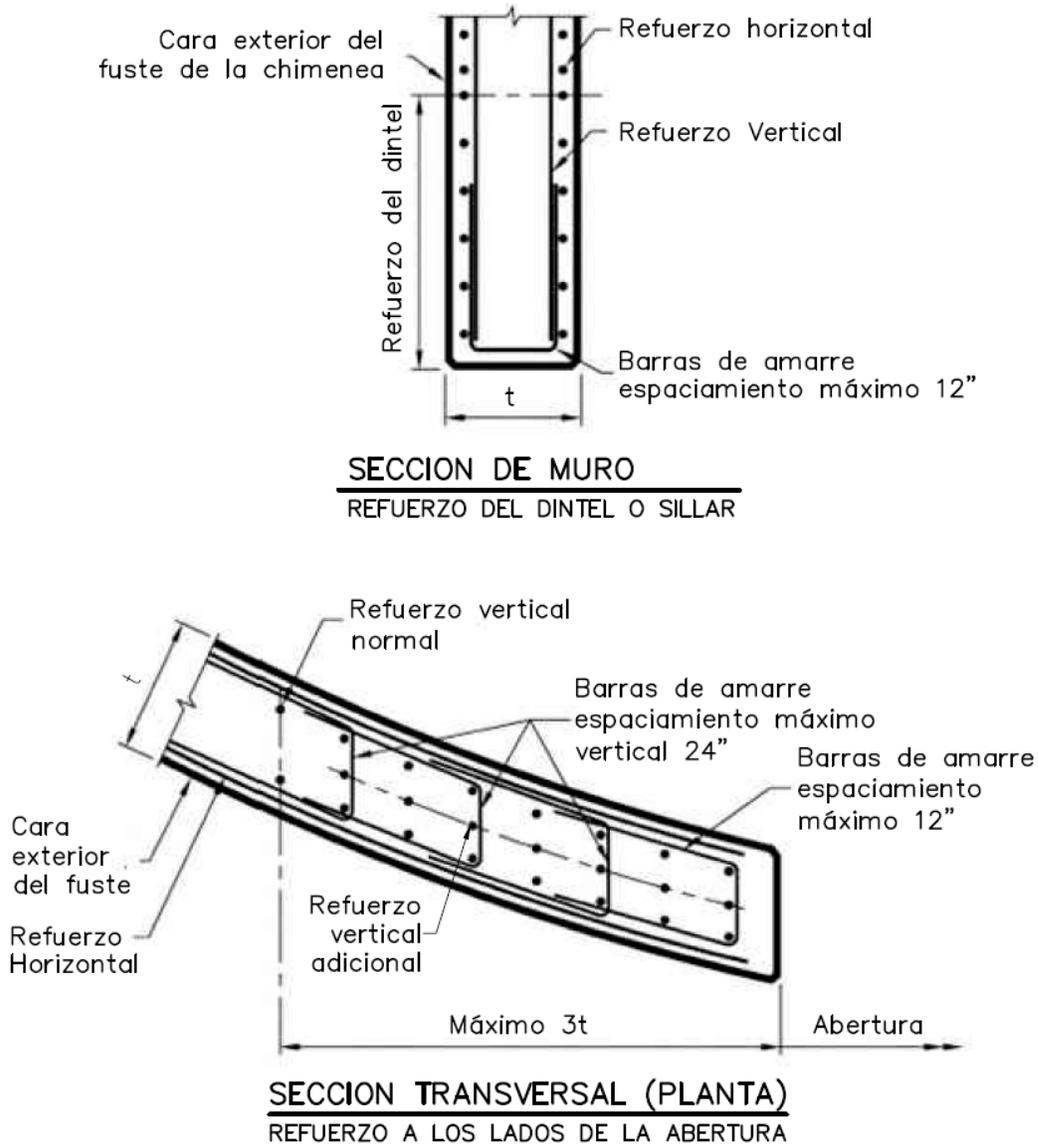
la parte superior del fuste de la chimenea. Las barras de amarre serán como mínimo núm. 3, y estarán espaciadas a no más de 12 pulgadas (ver figura 15).

Figura 14. **Detalle de armado en las aberturas**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 15. **Barras de amarre (Tie bars) en las aberturas**



Fuente: Código ACI 307-08. p. 16.

3.5. Cálculo de las cargas de diseño

3.5.1. Carga sísmica

El ACI 307-08, establece que las cargas sísmicas se determinarán mediante un análisis espectral o un análisis en el tiempo. Sin embargo el ACI 307-79, presenta el análisis estático equivalente para el cálculo de cargas sísmicas. Este último método es aplicable para chimeneas industriales que tengan una altura no mayor a 60 metros, el cual se desarrollará en este trabajo de investigación.

Para realizar el análisis estático equivalente, se utiliza el siguiente procedimiento:

- Cálculo del período de vibración (T)

$$T = \frac{5 H^2}{d(b)} \frac{\rho_{ck}}{E_c} \frac{t(h)}{t(b)}^{0,3}$$

Donde:

- T = período de vibración, en segundos
H = altura de la chimenea, en pies
d⁻(b) = diámetro medio de la base, en pies
ρ_{ck} = densidad de masa del concreto, en kip-s²/pie⁴,
aproximadamente igual a 0,0046 kip-s²/pie⁴
E_c = módulo de elasticidad del concreto, en kip/pie²
t(h) = espesor de la pared del fuste en la punta, en pies
t(b) = espesor de la pared del fuste en la base, en pies

- Cálculo del corte basal (V)

Según el código UBC 1997, el corte basal se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V = 0,56C_a I_E W$$

Además, en zona sísmica 4, el corte basal no deberá ser menor que:

$$V = 1,6Z N_v I_E W / R$$

Donde:

- V = corte basal, en libras
- Z = factor de zona sísmica
- W = peso de la chimenea, en libras
- C_a = coeficiente de sismicidad
- N_v = factor de cercanía a la fuente
- I_E = factor de importancia (1,25 para chimeneas)
- R = factor para estructuras que no son edificios (3,6 para chimeneas)

- Distribución de las fuerzas horizontales (F_h)

La chimenea debe dividirse en varios segmentos, según el criterio del diseñador, pero no deben ser menos de 10 segmentos. El 15 por ciento de la fuerza horizontal total V , se deberá considerar concentrada en la parte superior de la chimenea. El resto deberá distribuirse de acuerdo con la ecuación:

$$F_h = \frac{0,85V W_h h}{W_h h}$$

Donde:

F_h = fuerza horizontal a un nivel designado como “ h ”, en libras

W_h = porción de W , que se asigna al nivel designado como “ h ”, en libras

h = altura por encima de la base para el nivel designado como “ h ”, en pies

- Determinación de los momentos en los distintos niveles (M_x)

El momento de diseño en cualquier nivel de la chimenea, se deberá calcular por la ecuación:

$$M_x = Jx \ 0,15V(H-h_x) + F_h (h-h_x)$$

$$J_x = J + (1 - J) \frac{h_x^3}{H^3}$$

$$J = \frac{0,6}{3 \overline{T}}$$

J no debe ser mayor a 1, ni menor a 0,45

Donde:

M_x = momento en cualquier nivel “ x ”, en libra-pie

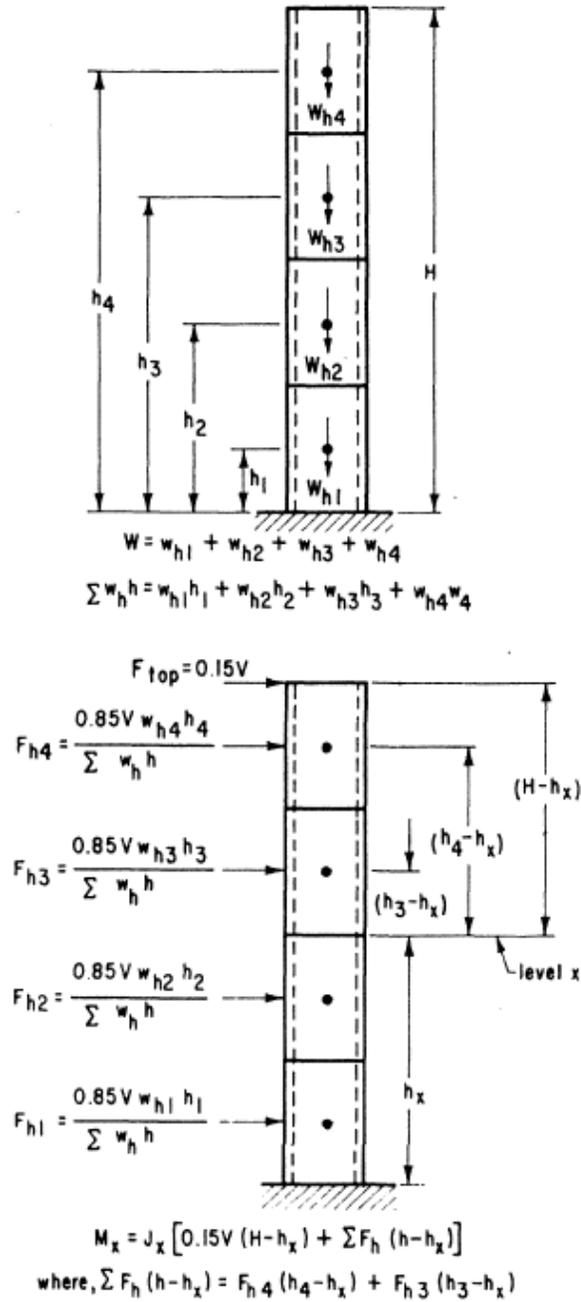
J_x = coeficiente numérico para el momento en un nivel designado “ x ”

J = coeficiente numérico para el momento de la base

h_x = altura por encima de la base de la chimenea hasta la base de la sección “ x ”, en pies

Para una mejor comprensión del procedimiento anterior ver figura 16.

Figura 16. Análisis estático equivalente



Fuente: ACI 307-79. p. 12.

3.5.2. Cargas de viento

Según el ACI 307-08, la chimenea se diseñará para resistir las cargas de viento en ambas direcciones, en la dirección del viento (barlovento) y en la dirección contraria al viento (sotavento). Adicionalmente la chimenea será diseñada para resistir las cargas debidas a la distribución de la presión radial.

Para el cálculo de las cargas de viento, el ACI 307-08 se apoya en el código ASCE-02, el cual brinda las velocidades básicas de diseño en millas por hora (ver anexos, figura 46). Sin embargo, estas son mucho mayores a las velocidades de viento que se dan en el territorio nacional (ver anexos, figura 47). Es por este motivo que, en el presente trabajo de investigación, únicamente se le dará énfasis a la carga sísmica, en lo que se refiere al diseño por flexión vertical, por ser la condición más crítica para Guatemala. Únicamente se considerarán las cargas por viento, en lo que respecta al diseño del refuerzo circunferencial, puesto que la presión radial que ejerce el viento sobre la chimenea, genera esfuerzos de flexión circunferenciales.

El procedimiento para calcular los momentos de flexión circunferenciales, debido a la presión radial del viento, es el siguiente:

- Calcular la velocidad de diseño, V_r , y la velocidad media por hora $\bar{V}(z)$, para una altura “z”, en pies/s

$$V_r = (I)^{0,5} v$$

$$\bar{V}(z) = 1,47 V_r \frac{z}{33}^{0,154} \quad (0,65)$$

Donde:

v = velocidad básica del viento, en mph

I = factor de importancia (1,15 para chimeneas)

z = altura sobre el nivel del suelo, en pies

- Calcular la presión debida a la velocidad media por hora $\bar{p}(z)$, en lb/pie²

$$\bar{p}(z) = 0,00119Kd [\bar{V}(z)]^2$$

Donde:

$Kd = 0,95$, para chimeneas de sección circular

- Calcular el factor de ráfaga para presión radial del viento $Gr(z)$

$$Gr(z) = 4 - 0,8 \log_{10} z = 4 \text{ para } z < 1 \text{ pie}$$

- Calcular la presión radial $p_r(z)$, en lb/pie²

$$p_r(z) = \bar{p}(z) Gr(z)$$

- Calcular los máximos momentos circunferenciales

$$M_i(z) = 0,31 p_r(z) r(z)^2$$

$$M_o(z) = 0,27 p_r(z) r(z)^2$$

Donde:

$M_i(z)$ = máximo momento circunferencial, debido a presión radial del viento, para tensión interior, en lb-pie/pie

$M_o(z)$ = máximo momento circunferencial, debido a presión radial del viento, para tensión exterior, en lb-pie/pie

$r(z)$ = radio medio para la altura "z"

Nota: la presión $p_r(z)$ se incrementará en un 50 por ciento para el tramo limitado por el extremo superior de la chimenea, y una sección ubicada a 1,5 d(h) de él.

3.5.3. Esfuerzos térmicos

Según el ACI 307-08, se deberán considerar los esfuerzos térmicos verticales y esfuerzos térmicos horizontales. Dichos esfuerzos se calcularán, una vez se tenga diseñado el refuerzo vertical por flexo-compresión, y el refuerzo circunferencial por presión radial del viento.

Los esfuerzos térmicos verticales, se calcularán por medio de las siguientes ecuaciones:

$$f_{CTV}'' = \alpha_{te} c T_x E_c$$

$$c = -\rho n \gamma_1 + 1 + \frac{\rho n \gamma_1 + 1}{\rho n \gamma_1 + 1 + 2\rho n \gamma_2 + \gamma_1(1 - \gamma_2)}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

Donde:

- f'_{CTV} = máximo esfuerzo térmico vertical en el concreto, en el interior de la chimenea, en psi
- α_{te} = coeficiente de dilatación térmica del concreto y del acero, igual a aproximadamente $6,5 \times 10^{-6}/^{\circ}F$
- c = relación de la distancia desde la fibra extrema en compresión al eje neutro para esfuerzos verticales al espesor total t
- T_x = gradiente térmico a través de la fuste de concreto, $^{\circ}F$
- γ_1 = relación entre el área de acero vertical en la cara interior y el área de acero vertical en la cara exterior
- γ_2 = relación entre la distancia de la cara interior de la pared de la chimenea y la línea central de la capa de refuerzo exterior y el espesor total de la pared
- ρ = relación entre el área de acero ubicado en la capa exterior y el área total de la sección en estudio
- E_s = módulo de elasticidad del acero, en psi (29×10^6 psi)

Y además:

$$f''_{STV} = \alpha_{te} (c-1+\gamma_2) T_x n E_c$$

$$f_{STV} = \alpha_{te} (\gamma_2-2) T_x E_s$$

Donde:

- f''_{STV} = máximo esfuerzo térmico vertical en el acero, en el interior de la chimenea, en psi
- f_{STV} = máximo esfuerzo térmico vertical en el acero, en el exterior de la chimenea, en psi

El gradiente térmico T_x se calcula mediante las ecuaciones presentadas en la figura 17.

Donde:

r_q = relación entre la transmisión de calor a través de la chimenea y la transmisión de calor a través del revestimiento en chimeneas con ventilación del aire interior

T_i = máxima temperatura de diseño de los gases en el interior de la chimenea, en °F

T_o = mínima temperatura del aire que rodea la chimenea, en °F

C_c = coeficiente de conductividad térmica del fuste de concreto de la chimenea, en Btu pulg/h pie²°F

C_b = coeficiente de conductividad térmica del revestimiento, en Btu pulg/h pie²°F

C_s = coeficiente de conductividad térmica del material aislante, en Btu pulg/h pie²°F

K_i = coeficiente de transmisión de calor de los gases a la superficie interior del revestimiento de la chimenea si la chimenea cuenta con él o a la cara interior de la pared de la chimenea si no cuenta con él, en Btu/pie²/h/°F

K_o = coeficiente de transmisión de calor de la cara exterior de la chimenea al aire circundante, en Btu/pie²/h/°F

K_r = coeficiente de transmisión de calor por radiación en la cara exterior de la chimenea, en Btu/pie²/h/°F

K_s = coeficiente de transmisión de calor entre la superficie externa del revestimiento y la cara interior de la pared de la chimenea cuando ésta posee cámara de ventilación, en Btu/pie²/h/°F

d_b = diámetro medio del ducto, en pies

- d_{bi} = diámetro interior del ducto, en pies
- d_c = diámetro medio de la pared del fuste de la chimenea, en pies
- d_{ci} = diámetro interior de la pared del fuste, en pies
- d_{co} = diámetro exterior de la pared del fuste, en pies
- d_s = diámetro medio del espacio entre el ducto y fuste, en pies
- t = espesor del fuste de la chimenea en pulgadas
- t_b = espesor del revestimiento en pulgadas

A menos que se realicen estudios completos del equilibrio térmico para cada chimenea en particular, se permite utilizar constantes:

$$r_q = 0,5$$

$$C_c = 12 \text{ Btu in/h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

C_b = obtenida del fabricante

$$K_o = 12 \text{ Btu/pie}^2/\text{h}/^\circ\text{F}$$

$$K_r = T_i / 120$$

$$K_s = T_i / 150$$

K_i = según figura 45 (anexos)

El valor de $r_q = 0,5$ se deberá aplicar solamente cuando la distancia entre el revestimiento y la pared de la chimenea no sea menor de 4 pulgadas (10 centímetros) en toda la altura del ducto interior y se provean aberturas de entrada y salida de aire a través de la pared de la chimenea en la parte inferior y superior, teniendo un área, en pies cuadrados, numéricamente igual a dos terceras partes del diámetro interior del ducto, en pies, en la parte superior del ducto.

Figura 17. Cálculo de T_x

| Condición | Valor de T_x |
|---|--|
| Chimeneas sin revestimiento | $T_x = \frac{td_{ci}}{C_c d_c} \left(\frac{T_i - T_o}{\frac{1}{K_i} + \frac{td_{ci}}{C_c d_c} + \frac{d_{ci}}{K_o d_{co}}} \right)$ |
| Chimeneas con revestimiento y material aislante en todo el espacio entre el concreto y el revestimiento | $T_x = \frac{td_{bi}}{C_c d_c} \left(\frac{T_i - T_o}{\frac{1}{K_i} + \frac{t_b d_{bi}}{C_b d_b} + \frac{t_s d_{bi}}{C_s d_s} \frac{td_{bi}}{C_c d_c} + \frac{d_{bi}}{K_o d_{co}}} \right)$ |
| Chimeneas con revestimiento sin material aislante y sin ventilación del aire entre el concreto y el revestimiento | $T_x = \frac{td_{bi}}{C_c d_c} \left(\frac{T_i - T_o}{\frac{1}{K_i} + \frac{t_b d_{bi}}{C_b d_b} + \frac{d_{bi}}{K_y d_b} \frac{td_{bi}}{C_c d_c} + \frac{d_{bi}}{K_o d_{co}}} \right)$ |
| Chimeneas con revestimiento sin material aislante y con ventilación del aire entre el concreto y el revestimiento | $T_x = \frac{td_{bi}}{C_c d_c} \left(\frac{T_i - T_o}{\frac{1}{r_q K_i} + \frac{t_b d_{bi}}{r_q C_b d_b} + \frac{d_{bi}}{K_s d_s} \frac{td_{bi}}{C_c d_c} + \frac{d_{bi}}{K_o d_{co}}} \right)$ |

Fuente: Teodoro E. Harmsen. Diseño de Estructuras de Concreto Armado. p. 542.

Los esfuerzos térmicos circunferenciales se calculan por:

$$f''_{CTC} = \alpha_{te} c' T_x E_c$$

$$c' = -\rho' n \gamma_1' + 1 + \frac{\rho' n \gamma_1' + 1}{2} + 2\rho' n \gamma_2' + \gamma_1' (1 - \gamma_2')$$

Donde:

- f'_{CTC} = máximo esfuerzo en el concreto en el interior de la chimenea, en psi
- c' = c para esfuerzo circunferencial
- ρ' = relación del área de refuerzo circunferencial exterior por unidad de altura al área total de concreto por unidad de altura
- γ_1' = relación entre el área de refuerzo horizontal en la capa interior y el área de refuerzo horizontal en la capa exterior
- γ_2' = relación entre la distancia de la cara interior de la pared de la chimenea a la capa de refuerzo exterior y el espesor total de la pared de la chimenea.

Y además:

$$f_{STC} = \alpha_{te} (\gamma_2' - c') T_x E_s$$

Donde:

f_{STC} = máximo esfuerzo en el refuerzo circunferencial exterior de la chimenea, en psi

3.5.4. Combinación de cargas

La resistencia vertical requerida (U_v), para resistir la carga muerta (D), carga sísmica (E), y efectos térmicos (T) será la mayor de las tres ecuaciones dadas a continuación:

- $U_v = 1,4 D$
- $U_v = 0,9 D + 1,0 E + 1,2 T$
- $U_v = 1,2 D + 1,0 E + 1,2 T$

Generalmente, en zonas sísmicas, como Guatemala, la segunda combinación resulta ser la más onerosa (esto se demuestra en la tabla XXV, apéndices).

La resistencia circunferencial (U_c) para resistir viento (W) y carga térmica (T) estará dada por: $U_c = 1,2 T + 1,4 W$

3.6. Procedimiento de diseño

El método que se utilizará es el de resistencia última. A continuación se describe el procedimiento de diseño, para el refuerzo vertical y para el refuerzo circunferencial.

3.6.1. Diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión y temperatura

A continuación se presentan dos métodos para el diseño del refuerzo por peso propio y sismo (flexo-compresión). El primero es el presentado por el ACI 307-08, y el segundo, es el presentado por el Dr. Wadi S. Rumman. Para ver una comparación entre ambos métodos ver tabla XXIV (apéndices).

3.6.1.1. Método del ACI 307-08

El procedimiento de diseño consta de cinco pasos, aunque se deberán realizar varias iteraciones. Para saber qué es cada variable ver Lista de Símbolos.

- Asumir una cuantía ρ_t
- Por ensayo y error, hallar el valor de α que satisface la ecuación:

$$\frac{P_u}{r t f c} = K_1 = 1,7Q\lambda + 2\varepsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2\omega_t \lambda_1$$

Donde:

$$K_e = E_s / f_y$$

$$\omega_t = \frac{\rho_t f_y}{f c}$$

$$\lambda = \tau - n_1 \beta$$

$$Q_1 = \frac{\sin \psi - \sin \mu - \psi - \mu \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

$$\lambda_1 = \mu + \psi - \pi$$

$$\cos \tau = 1 - \beta_1 (1 - \cos \alpha)$$

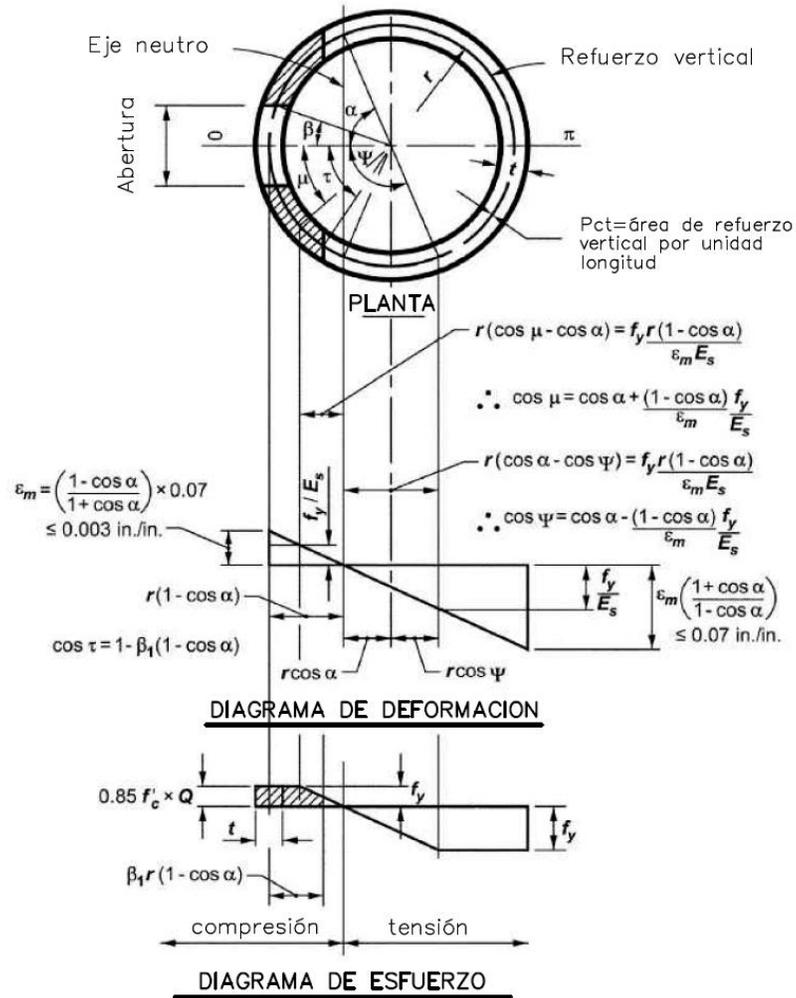
$$\cos \psi = \cos \alpha - \frac{1 - \cos \alpha}{\varepsilon_m} \frac{f_y}{E_s} \geq -1$$

$$\cos \mu = \cos \alpha + \frac{1 - \cos \alpha}{\varepsilon_m} \frac{f_y}{E_s} \leq 1$$

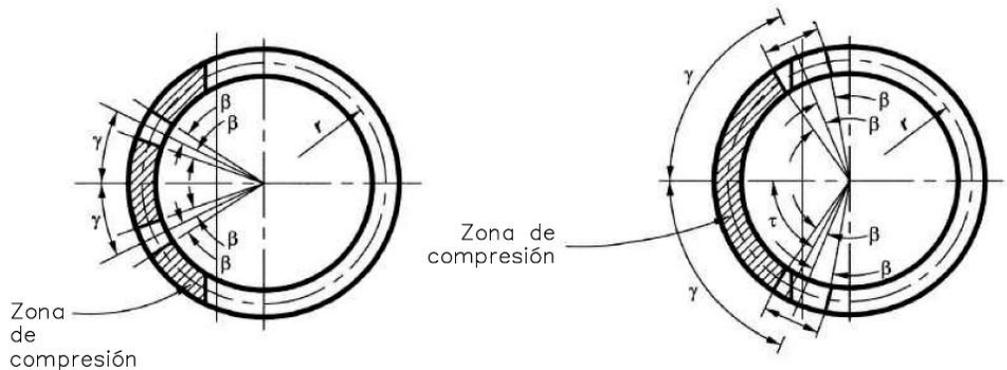
$$\varepsilon_m = 0,07 \frac{1 - \cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \leq 0,003$$

Los ángulos α , γ , β , τ , ψ , y μ se muestran en la figura 18. El caso a, es para una sola abertura en zona de compresión. El caso b para dos aberturas en zona de compresión. Y c para dos aberturas parcialmente en compresión.

Figura 18. Diagrama de esfuerzos



(a) una abertura en zona de compresión



(b) dos aberturas en zona de compresión

(c) dos aberturas simétricas en zona de compresión

Fuente: Código ACI 307-08. p. 19.

El valor del parámetro Q depende de α (en grados). Ver tabla II.

Tabla II. Valor del parámetro Q

| α (°) | Q |
|-----------------------|--|
| $\alpha \leq 5$ | $Q = -0,523 + 0,181\alpha - 0,0154\alpha^2 + 41,3 - 13,2\alpha + 1,32\alpha^2$ (t/r) |
| $5 < \alpha \leq 10$ | $Q = -0,154 + 0,01773\alpha + 0,00249\alpha^2 + 16,42 - 1,98\alpha + 0,0674\alpha^2$ (t/r) |
| $10 < \alpha \leq 17$ | $Q = -0,488 + 0,076\alpha + 9,758 - 0,64\alpha$ (t/r) |
| $17 < \alpha \leq 25$ | $Q = -1,345 + 0,2018\alpha - 0,004434\alpha^2 + 15,83 - 1,676\alpha + 0,03994\alpha^2$ (t/r) |
| $25 < \alpha \leq 35$ | $Q = 0,993 - 0,00258\alpha + (-3,27 + 0,0862\alpha)(t/r)$ |
| $\alpha > 35$ | $Q = 0,89$ |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: en ningún caso β podrá ser mayor a 30 grados. Las aberturas en zona de tensión se desprecian porque no se está tomando en cuenta la resistencia a tensión del concreto y porque las barras cortadas por las aberturas, son reemplazadas a los lados de ésta.

- Una vez encontrado el valor de α , calcular el momento nominal M_n

$$\frac{M_n}{P_u r} = K_3 = \cos \alpha + \frac{K_2}{K_1}, \quad M_n = P_u r K_3$$

Donde:

$$K_2 = 1,7Q\bar{R} + \varepsilon_m K_e \omega_t Q_2 + 2\omega_t K$$

$$Q_2 = \frac{\psi - \mu \quad 1 + 2\cos^2 \alpha + 0,5 \quad 4 \sin 2\alpha + \sin 2\psi - \sin 2\mu \quad - \zeta}{1 - \cos \alpha}$$

$$\zeta = 4 \cos \alpha (\sin \alpha + \sin \psi - \sin \mu)$$

$$K = \sin \psi + \sin \mu + \pi - \psi - \mu \cos \alpha$$

$$\bar{R} = \sin \tau - \tau - n_1 \beta \cos \alpha - \frac{n_1}{2} (\sin(\gamma + \beta) - \sin(\gamma - \beta))$$

Donde:

$\gamma = \frac{1}{2}$ ángulo entre las líneas centrales de dos aberturas (ver figura 18).

Si no hay aberturas, $n_1 = \gamma = \beta = 0$; para una abertura en zona de compresión, $n_1 = 1$, $\gamma = 0$; para dos aberturas $n_1 = 2$. Para dos aberturas simétricas parcialmente en compresión (ver figura 18):

$$\begin{aligned} \gamma + \beta > \tau \quad \text{y} \quad \gamma - \beta < \tau \\ \delta = \gamma - \beta \end{aligned}$$

Entonces, en el segundo paso:

$$\lambda = \delta$$

Y:

$$\bar{R} = \sin \delta - \delta \cos \alpha$$

- Si $\emptyset M_n < M_u$, aumentar ρ_t ; si $\emptyset M_n \geq M_u$, disminuir ρ_t
- Repetir los pasos anteriores hasta que $\emptyset M_n \geq M_u$

El factor de reducción de resistencia, \emptyset , para el diseño del refuerzo vertical, será 0,80 y para el diseño del refuerzo circunferencial, 0,90.

Para las combinaciones con los efectos de temperatura, se debe reemplazar f_y y f'_c por $f'_y(v)$ y $f''_c(v)$, respectivamente:

$$f'_y(v) = f_y - \frac{1,2}{1+\gamma_1} (f_{STV} - \gamma_1 f''_{STV})$$

$$f''_c(v) = f'_c - 1,2 f'_{CTV}$$

Donde f_{STV} , f''_{STV} , f'_{CTV} , se obtienen según la sección 3.5.3.

3.6.1.2. Método del Dr. Wadi S. Rumman

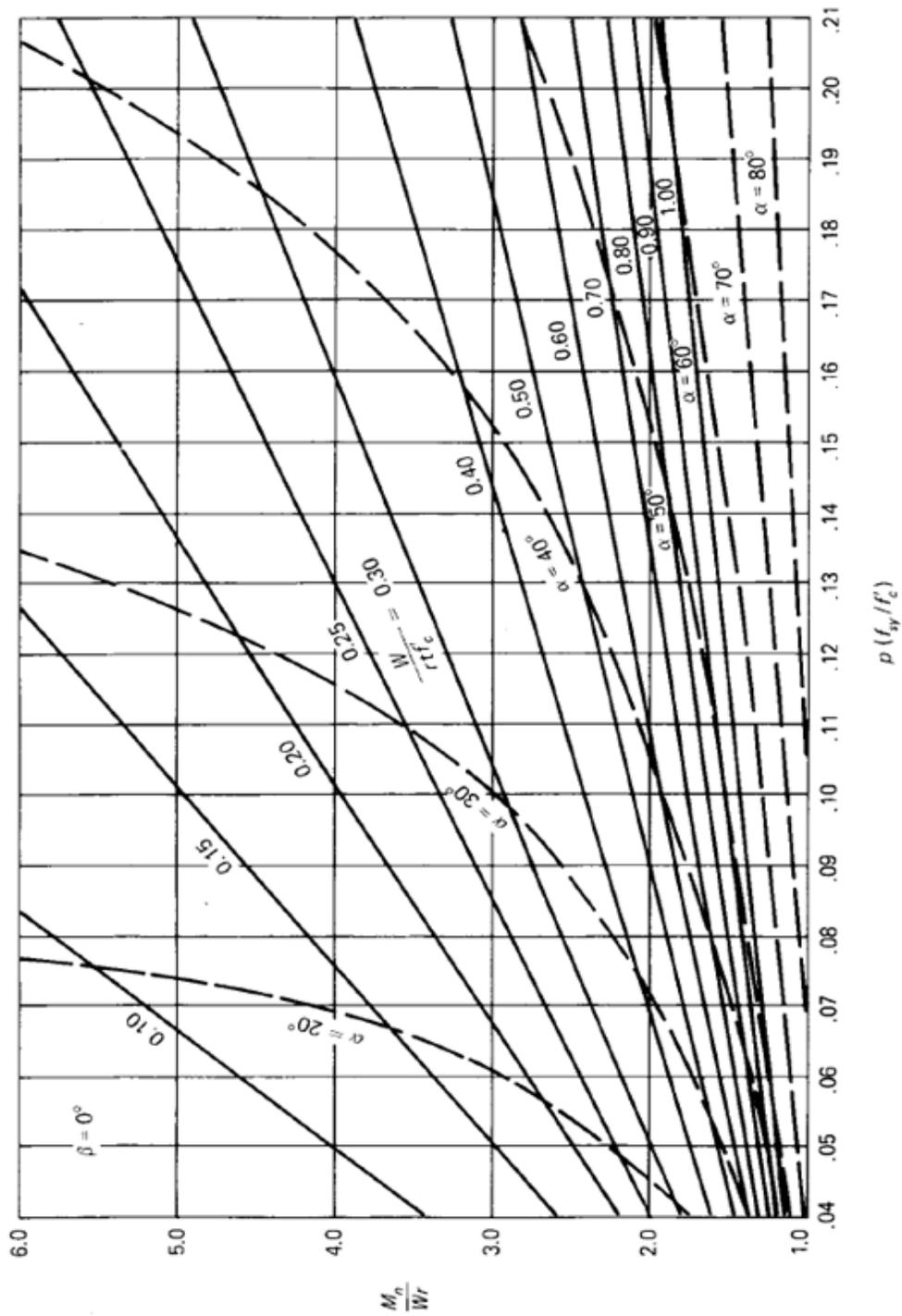
El método anterior, utiliza expresiones complejas y se resuelve por iteración. Sin embargo este se puede simplificar, según el Dr. Wadi S. Rumman, por medio de las curvas dadas en las figuras 19, 20, 21 y 22, las cuales son representadas, aproximadamente, por la siguiente ecuación:

$$\frac{M_n}{P_u r} = 1 + 6 - 2 \frac{P_u}{r t f'_c} \frac{\rho_t f_y / f'_c}{\frac{P_u}{r t f'_c}} \left(1 - \frac{\beta^{1.15}}{200} \right)$$

Donde:

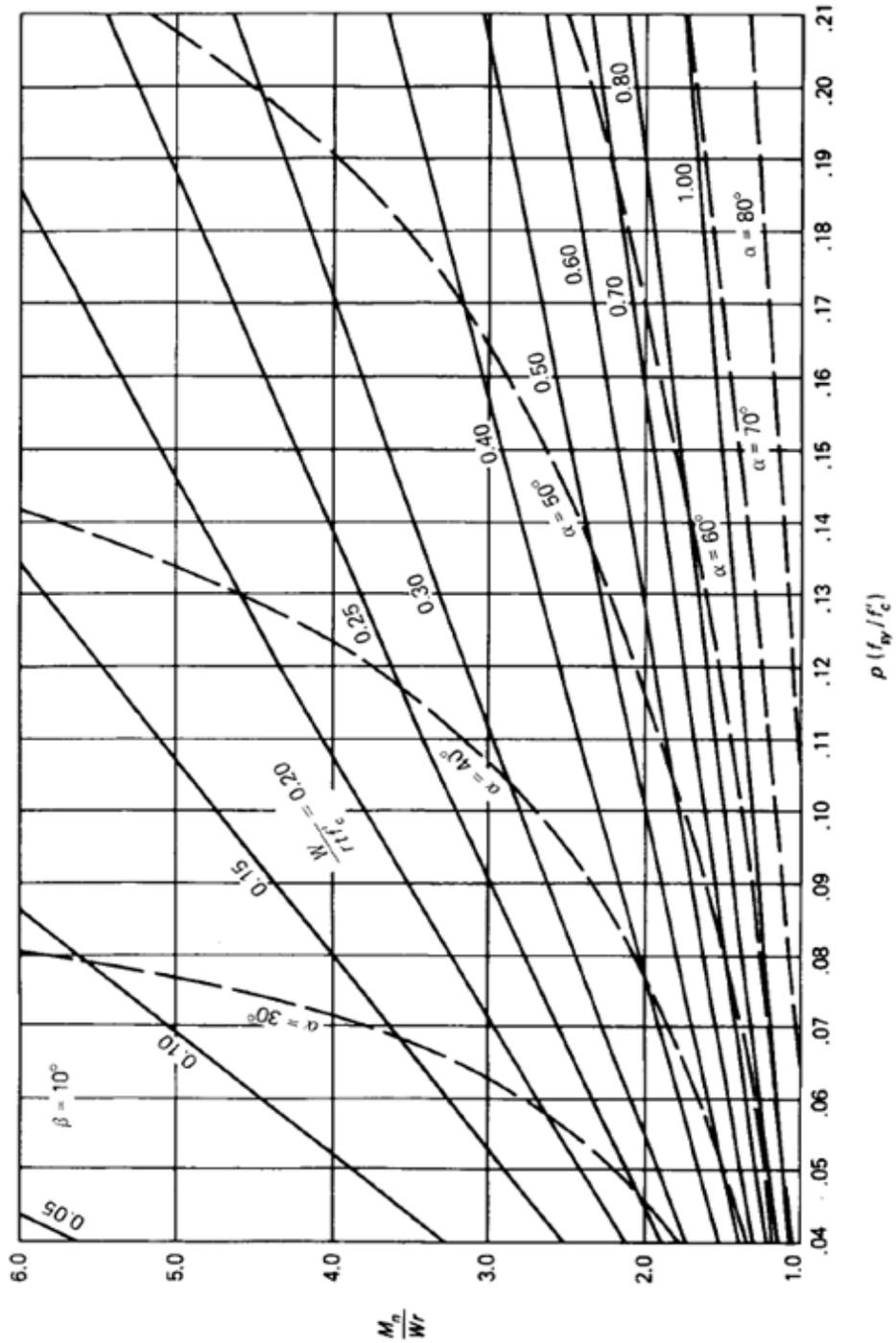
- M_n = momento nominal, en lb-pulg
- P_u = carga vertical factorada, en lb
- r = radio medio de la sección, en pulg
- t = espesor del muro, en pulg
- ρ_t = cuantía de acero vertical total
- β = mitad del ángulo central formado por la abertura con una cuerda en el círculo de radio r , en grados (ver figura 18).

Figura 19. Diseño por resistencia última sin abertura ($\beta = 0^\circ$)



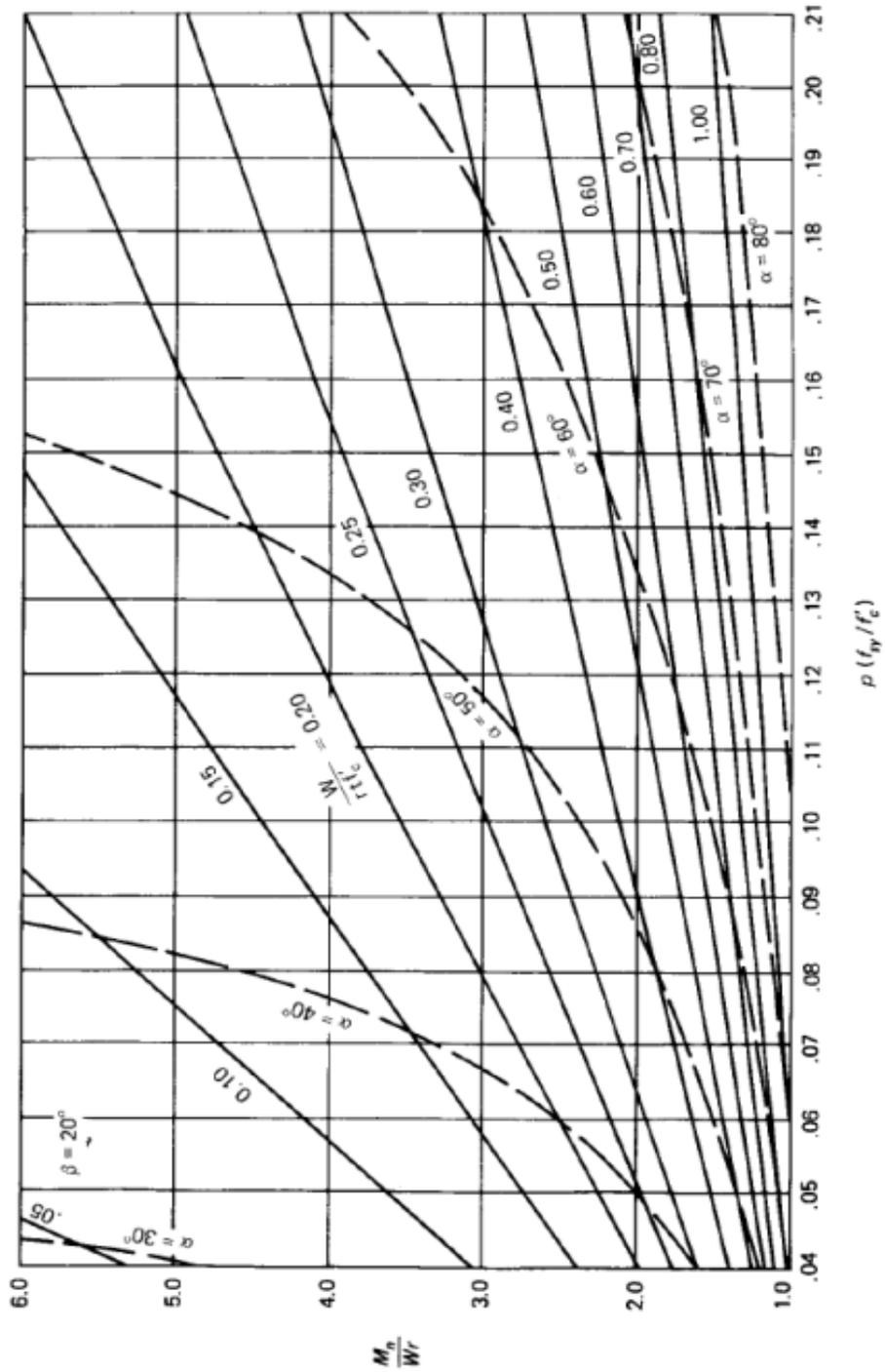
Fuente: Fintel, Mark. Handbook of Concrete Engineering. p. 575.

Figura 20. Diseño por resistencia última con abertura ($\beta = 10^\circ$)



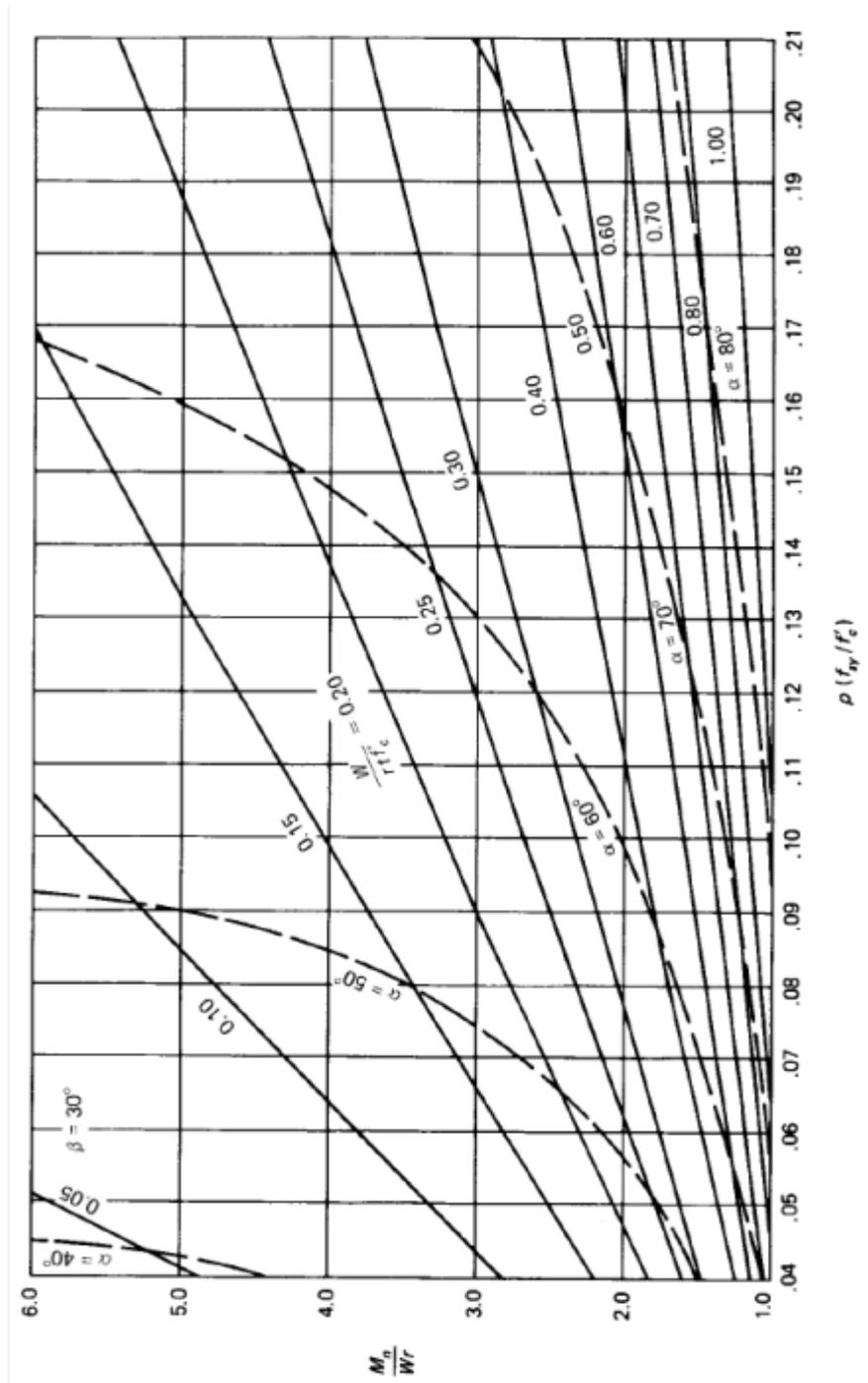
Fuente: Fintel, Mark. Handbook of Concrete Engineering. p. 575.

Figura 21. Diseño por resistencia última con abertura ($\beta = 20^\circ$)



Fuente: Fintel, Mark. Handbook of Concrete Engineering. p. 576.

Figura 22. Diseño por resistencia última con abertura ($\beta = 30^\circ$)



Fuente: Fintel, Mark. Handbook of Concrete Engineering. p. 576.

Para las combinaciones con los efectos de temperatura, tal y como en el procedimiento anterior, reemplazar f_y y f'_c por $f'_y(v)$ y $f''_c(v)$, respectivamente:

$$f'_y(v) = f_y - \frac{1,2}{1+\gamma_1} (f_{STV} - \gamma_1 f''_{STV})$$

$$f''_c v = f'_c - 1,2f'_{CTV}$$

Donde f_{STV} , f''_{STV} , f'_{CTV} , se obtienen según la sección 3.5.3.

3.6.2. Diseño del refuerzo circunferencial

Cualquier franja de la columna de concreto, se diseñará como una viga horizontal sometida a momentos de flexión circunferenciales. Estos momentos son los que se obtienen en la sección 3.5.2.

Para la combinación con los esfuerzos térmicos, se debe reemplazar f_y y f'_c por $f'_y(c)$ y $f''_c(c)$, respectivamente:

$$f'_y(c) = f_y - 1,2f_{STC}$$

$$f''_c c = f'_c - 1,2f'_{CTC}$$

Donde f_{STC} , y f'_{CTC} , se obtienen según la sección 3.5.3.

4. EJEMPLO DE DISEÑO

4.1. Datos y dimensionamiento del modelo

Se desea diseñar una chimenea de 150 pies de altura sobre el nivel del suelo, asumiendo muros de 8 pulgadas de espesor (sección 4.1.3.1 del ACI 307-08), y que cuenta con un revestimiento interior de ladrillo refractario de 4,5 pulgadas de espesor y un espacio de ventilación de 6 pulgadas, soportado por ménsulas a cada 30 pies. Asumir que los muros se encuentran enterrados a 1 pie de profundidad de la superficie del terreno. La puerta de limpieza de 3 pies x 3 pies se colocará 4 pulgadas sobre el nivel del terreno, mientras que la abertura para la entrada de humos, será de 3 pies x 6 pies y se ubica a 8 pies sobre el suelo y diametralmente opuesta a la puerta de limpieza (ver figura 23). El ejemplo se desarrollará utilizando el sistema inglés.

- Determinación del diámetro en la base $d(b)$: se recomienda que la relación entre la altura y el diámetro de la base sea de 12-13. Tomando dicha relación igual a 13:

-

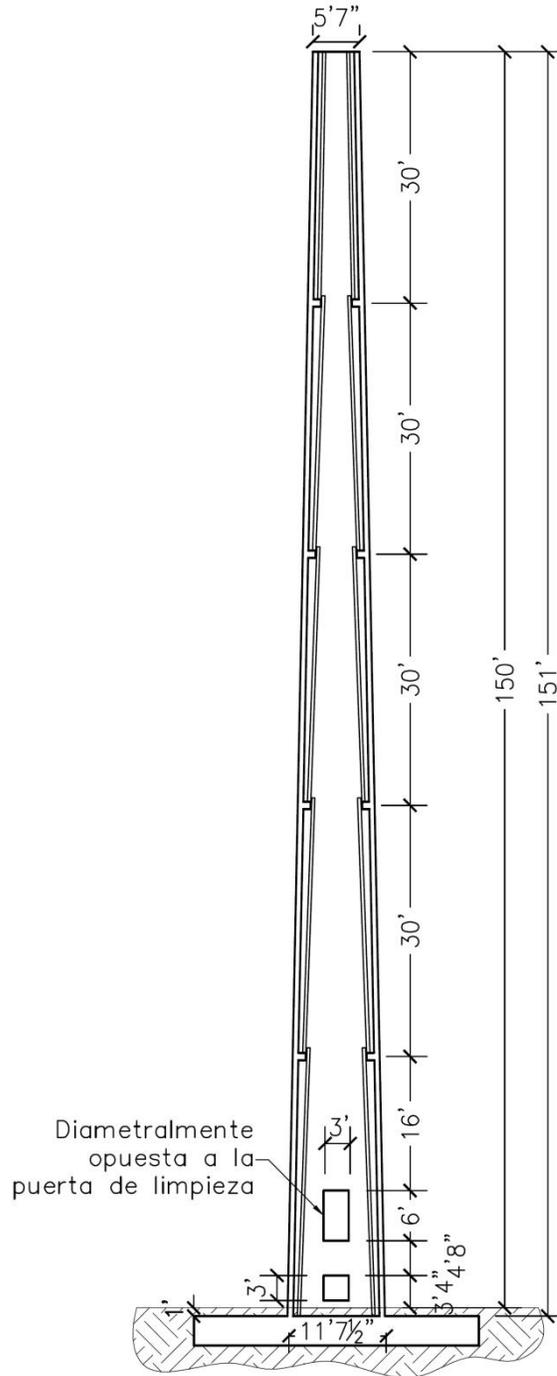
$$h / d(b) = 13$$

$$d(b) = (150' + 1') / 13 = 11,62' \text{ (11' 7\frac{1}{2}")}$$

- Determinación del diámetro en la punta $d(h)$: las pendientes de los muros de la chimenea, pueden ser desde 1/50 a 1/100. Tomando 1/50:

$$d(h) = 11,62' - 2(151' / 50) = 5,58' \text{ (5' 7")} \quad \text{(ver apéndices, figura 43)}$$

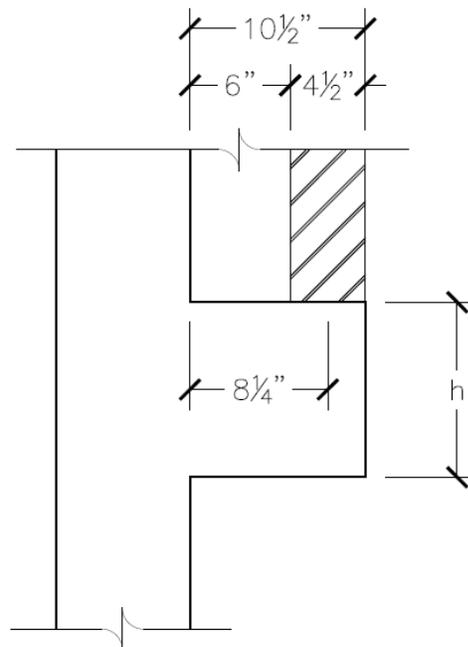
Figura 23. Dimensiones del modelo a diseñar



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

- Dimensionamiento de ménsulas: las dimensiones de las ménsulas se establecerán en base al ACI 318-08, sección 11.8. La longitud, es de 10,5 pulgadas y el punto donde se aplica la carga (luz de cortante) a_v es 8,25 pulgadas. Ver figura 24, cuyas medidas están dadas en pulgadas. Se utilizará un recubrimiento de 1,5 pulgadas y concreto de 4 000 libras por pulgada cuadrada:

Figura 24. Dimensiones de ménsula



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Según ACI 318-08, sección 11.8.1:

$$a_v/d < 1$$

$$d > a_v \rightarrow d > 8,25"$$

Considerando $d = 8,75''$:

$$a_v/d < 1$$
$$8,25/8,75 = 0,94 < 1 \quad \text{ok}$$

Por lo tanto, asumiendo un diámetro (d_v) de varilla 0,5 pulgadas (núm.4):

$$h = d + \text{rec} + d_v/2$$
$$h = 8,75'' + 1,5'' + 0,5''/2 = 10,5''$$

La carga por unidad de longitud (W) a soportar será:

$$W = (4,5''/12)(30')(125 \text{ lb/pie}^3) + (10,5''/12)(10,5''/12)(150 \text{ lb/pie}^3)$$
$$= 1\,521 \text{ lb/pie}$$

El cortante último, por unidad de longitud que debe resistir la sección de la ménsula (a cada 30 pies) y en base a la ecuación 9-1 del código ACI 318-08, será:

$$V_u = 1,4D$$
$$V_u = 1,4 \cdot 1\,521 \text{ lb} = 2\,129,4 \text{ lb}$$

Por lo que el cortante nominal es:

$$V_n = \frac{V_u}{\phi}$$
$$V_n = \frac{2\,129,4 \text{ lb}}{0,75} = 2\,839,2 \text{ lb}$$

Según ACI 318-08, sección 11.8.3.2.1, el cortante nominal no será mayor al menor de:

$$V_n \leq 0,2f'_c b_w d = 0,2 \cdot 4\,000 \text{ psi} \cdot (12") \cdot (8,75") = 84\,000 \text{ lb}$$

$$V_n \leq 480 + 0,08f'_c b_w d = 480 + 0,08 \cdot 4\,000 \text{ psi} \cdot (12") \cdot (8,75") = 84\,000 \text{ lb}$$

$$V_n \leq 1\,600b_w d = 1\,600(12")(8,75") = 168\,000 \text{ lb}$$

Por lo tanto:

$$V_n \leq 84\,000 \text{ lb}$$

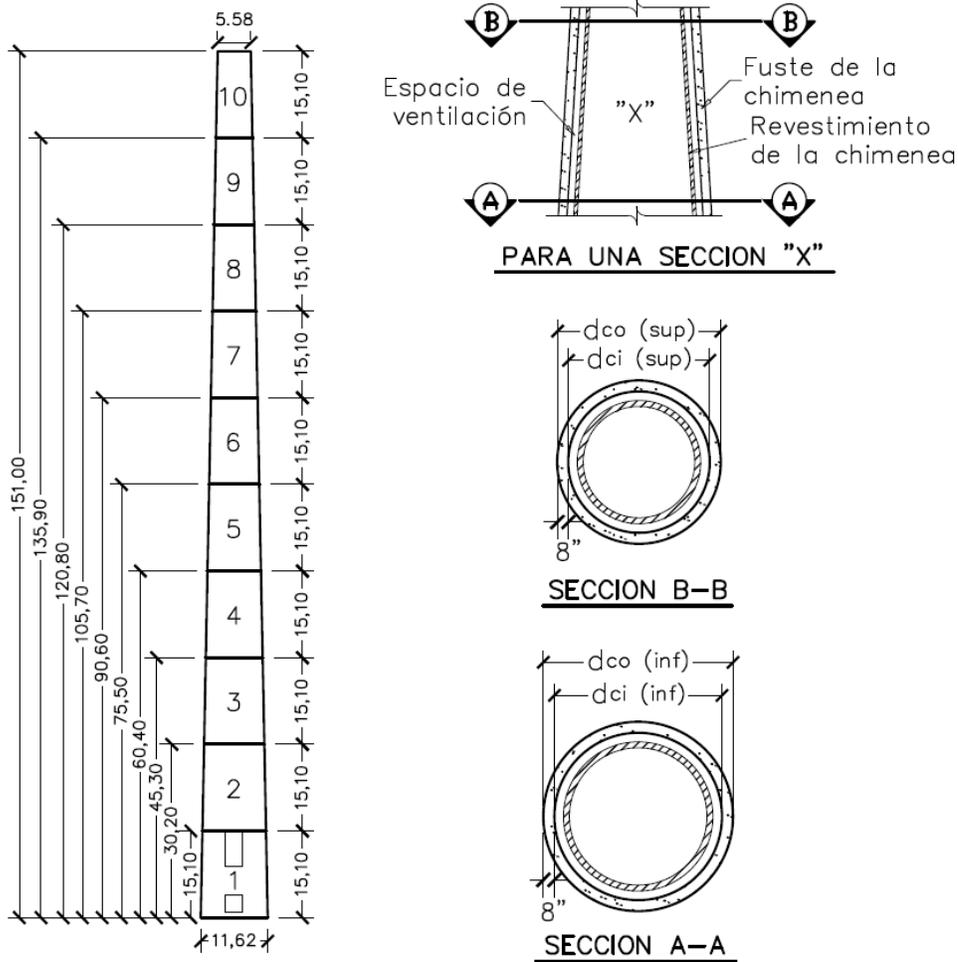
$$2\,839,4 \text{ lb} \leq 84\,000 \text{ lb} \quad \text{ok}$$

Esto significa que la sección resiste el cortante, por lo que las dimensiones propuestas son adecuadas ($l = 10,5"$, $h = 10,5"$).

4.2. Integración de cargas

Para el análisis y diseño de una chimenea, esta se debe dividir en por lo menos 10 secciones, según el ACI 307 (ver figura 25, cuyas medidas están dadas en pies). A continuación se muestra la integración de cargas para cada sección, ver tablas III, IV y V.

Figura 25. Secciones de la chimenea



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Tabla III. **Peso del fuste de concreto**

| CONCRETO | | | | | | |
|-----------------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| Sección | h (pies) | Diámetros inferiores | | Diámetros superiores | | Peso (lb) |
| | | d _{co} (pies) | d _{ci} (pies) | d _{co} (pies) | d _{ci} (pies) | |
| 1 | 15,10 | 11,62 | 10,28 | 11,01 | 9,68 | 50 506,07 |
| 2 | 15,10 | 11,01 | 9,68 | 10,41 | 9,07 | 47 640,81 |
| 3 | 15,10 | 10,41 | 9,07 | 9,80 | 8,47 | 44 775,54 |
| 4 | 15,10 | 9,80 | 8,47 | 9,20 | 7,87 | 41 910,28 |
| 5 | 15,10 | 9,20 | 7,87 | 8,60 | 7,26 | 39 045,01 |
| 6 | 15,10 | 8,60 | 7,26 | 7,99 | 6,66 | 36 179,75 |
| 7 | 15,10 | 7,99 | 6,66 | 7,39 | 6,05 | 33 314,48 |
| 8 | 15,10 | 7,39 | 6,05 | 6,78 | 5,45 | 30 449,22 |
| 9 | 15,10 | 6,78 | 5,45 | 6,18 | 4,85 | 27 583,95 |
| 10 | 15,10 | 6,18 | 4,85 | 5,58 | 4,24 | 24 718,69 |
| | | | | | | Σ = 376 123,79 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla III, se observa el peso del fuste de concreto para cada sección. Los diámetros interiores (d_{ci}) se obtienen al restar dos veces el espesor del muro al diámetro exterior. Mientras que los diámetros exteriores (d_{co}) para cualquier altura sobre el nivel del terreno (h_x), se obtienen a partir de la pendiente del muro m (m = 50 en este caso) y del diámetro exterior de la base (11,62 pies), tal y como en la figura 43 (apéndices):

$$d_{co} (a h_x) = 11,62' - 2 (h_x/m)$$

Por ejemplo para la sección 4, cuya base está ubicada a 45,3 pies de altura desde la base de la chimenea (45,3' = 15,10'*3):

$$d_{co} (inferior) = 11,62' - 2 (45,3'/50) = 9,80'$$

$$d_{ci} (inferior) = 9,80' - 2 (8''/12'') = 8,47'$$

Finalmente el peso del fuste de concreto por sección, se obtiene así:

$$W = \frac{\frac{\pi}{4} d_{co (sup)}^2 - d_{ci (sup)}^2 + \frac{\pi}{4} d_{co (inf)}^2 - d_{ci (inf)}^2}{2} * h * 150 \text{ lb/pie}^3$$

Por ejemplo para la sección 3:

$$W = \frac{\frac{\pi}{4} 10,41'^2 - 9,07'^2 + \frac{\pi}{4} 9,80'^2 - 8,47'^2}{2} * 15,10' * 150 \text{ lb/pie}^3$$

$$= 44 775,54 \text{ lb}$$

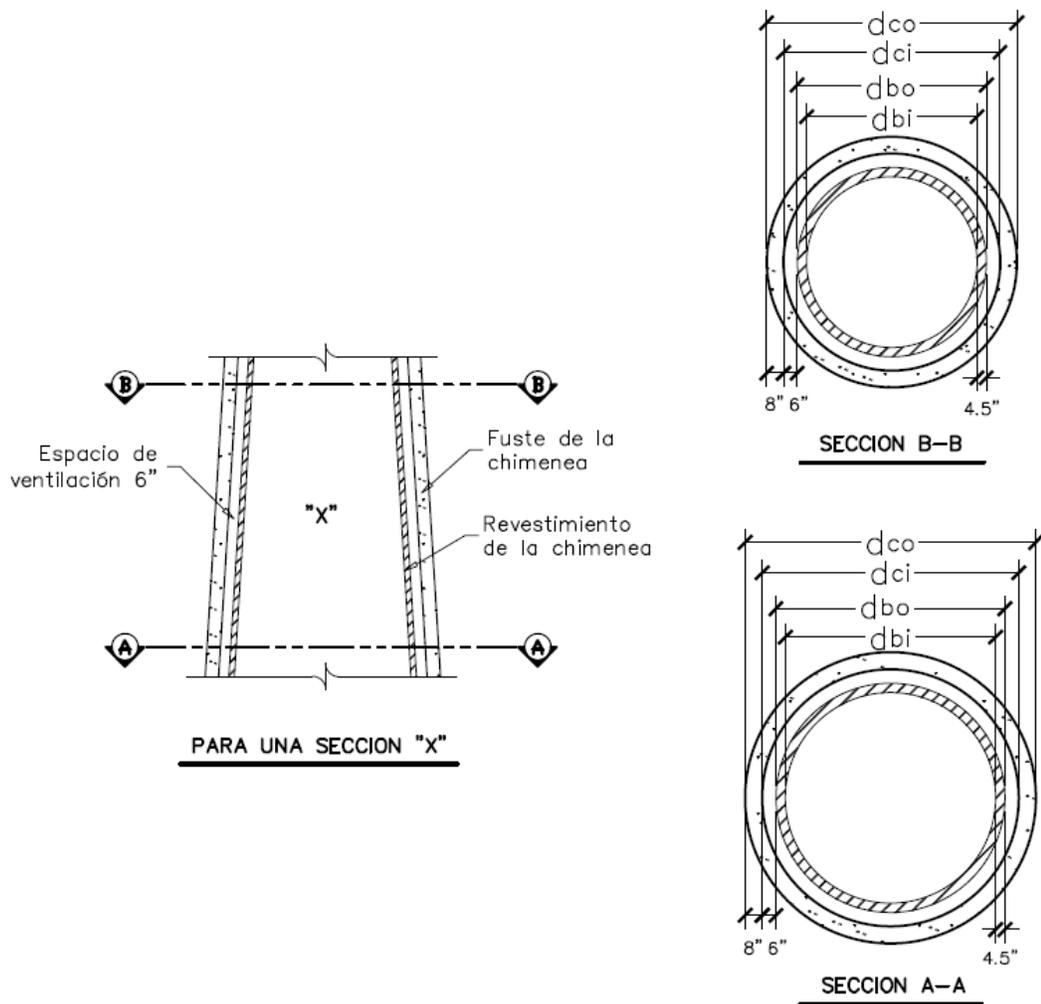
Tabla IV. **Peso del revestimiento**

| REVESTIMIENTO | | | | | | |
|----------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| Sección | h (pies) | Diámetros inferiores | | Diámetros superiores | | Peso (lb) |
| | | d_{bo} (pies) | d_{bi} (pies) | d_{bo} (pies) | d_{bi} (pies) | |
| 1 | 15,10 | 9,28 | 8,53 | 8,68 | 7,93 | 19 134,74 |
| 2 | 15,10 | 8,68 | 7,93 | 8,07 | 7,32 | 17 791,65 |
| 3 | 15,10 | 8,07 | 7,32 | 7,47 | 6,72 | 16 448,55 |
| 4 | 15,10 | 7,47 | 6,72 | 6,87 | 6,12 | 15 105,46 |
| 5 | 15,10 | 6,87 | 6,12 | 6,26 | 5,51 | 13 762,37 |
| 6 | 15,10 | 6,26 | 5,51 | 5,66 | 4,91 | 12 419,28 |
| 7 | 15,10 | 5,66 | 4,91 | 5,05 | 4,30 | 11 076,18 |
| 8 | 15,10 | 5,05 | 4,30 | 4,45 | 3,70 | 9 733,09 |
| 9 | 15,10 | 4,45 | 3,70 | 3,85 | 3,10 | 8 390,00 |
| 10 | 15,10 | 3,85 | 3,10 | 3,24 | 2,49 | 7 046,90 |
| | | | | | | Σ = 130 908,23 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla IV, se muestran el peso del revestimiento por cada sección. Para cualquier sección, el diámetro exterior (d_{bo}) del revestimiento, se obtiene restando, al diámetro interior (d_{ci}) del fuste de concreto respectivo (ver la tabla III), 2 veces el espacio de ventilación (6 pulgadas en este caso). Ver figura 26.

Figura 26. **Diámetros para una sección x de la chimenea**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Por ejemplo, para la sección 1:

$$d_{bo \text{ (inferior)}} = 10,28' - 2(6''/12'') = 9,28'$$

$$d_{bo \text{ (superior)}} = 9,68' - 2(6''/12'') = 8,68'$$

En tanto que los diámetros interiores (d_{bi}) se obtienen restando al diámetro exterior (d_{bo}) del revestimiento, 2 veces el espesor del mismo (4,5 pulgadas en este caso). Por ejemplo, para la sección 1:

$$d_{bi \text{ (inferior)}} = 9,28' - 2(4,5''/12'') = 8,53'$$

$$d_{bi \text{ (superior)}} = 8,68' - 2(4,5''/12'') = 7,93'$$

Finalmente el peso del revestimiento por sección, se obtiene así:

$$W = \frac{\frac{\pi}{4} d_{bo \text{ (sup)}}^2 - d_{bi \text{ (sup)}}^2 + \frac{\pi}{4} d_{bo \text{ (inf)}}^2 - d_{bi \text{ (inf)}}^2}{2} * h * 125 \text{ lb/pie}^3$$

Ahora sólo falta integrar el peso de las ménsulas. Para ello, se multiplicará la sección lateral de la ménsula por su longitud, la cual viene siendo el perímetro de la sección de la chimenea, a la altura en que se encuentre la ménsula. Según la figura 23, la primer ménsula se encuentra a 31 pies desde la base, la segunda a 61 pies, la tercera a 91 pies, y la cuarta a 121 pies. Los pesos totales de cada sección, se muestran en la tabla V. Entonces:

- Peso de la ménsula ubicada a 31 pies:

$$\text{Diámetro de la ménsula} = [11,62' - 2(31'/50)] - 2(8''/12'') = 9,05'$$

$$W = (10,5''/12'')(10,5''/12'')(\pi * 9,05')(150 \text{ lb/pie}^3) = 3 \ 265,17 \text{ lb}$$

- Peso de la ménsula ubicada a 61 pies:

$$\text{Diámetro de la ménsula} = [11,62' - 2(61'/50)] - 2(8''/12)' = 7,84'$$

$$W = (10,5''/12)'(10,5''/12)'(\pi * 7,84')(150 \text{ lb/pie}^3) = 2\,828,61 \text{ lb}$$

- Peso de la ménsula ubicada a 91 pies:

$$\text{Diámetro de la ménsula} = [11,62' - 2(91'/50)] - 2(8''/12)' = 6,65'$$

$$W = (10,5''/12)'(10,5''/12)'(\pi * 6,65')(150 \text{ lb/pie}^3) = 2\,399,27 \text{ lb}$$

- Peso de la ménsula ubicada a 121 pies:

$$\text{Diámetro de la ménsula} = [11,62' - 2(121'/50)] - 2(8''/12)' = 5,45'$$

$$W = (10,5''/12)'(10,5''/12)'(\pi * 5,45')(150 \text{ lb/pie}^3) = 1\,966,32 \text{ lb}$$

Tabla V. **Pesos totales por sección**

| Sección | Altura a la base de la sección h_x (pies) | Peso del concreto (lb) | Peso del revestimiento (lb) | Peso de ménsula (lb) | Peso total W_n (lb) |
|---------|---|------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| 1 | 0,00 | 50 506,07 | 19 134,74 | 0 | 69 640,81 |
| 2 | 15,10 | 47 640,81 | 17 791,65 | 0 | 65 432,45 |
| 3 | 30,20 | 44 775,54 | 16 448,55 | 3 265,17 | 64 489,27 |
| 4 | 45,30 | 41 910,28 | 15 105,46 | 0 | 57 015,74 |
| 5 | 60,40 | 39 045,01 | 13 762,37 | 2 828,61 | 55 635,99 |
| 6 | 75,50 | 36 179,75 | 12 419,28 | 0 | 48 599,02 |
| 7 | 90,60 | 33 314,48 | 11 076,18 | 2 399,27 | 46 789,93 |
| 8 | 105,70 | 30 449,22 | 9 733,09 | 0 | 40 182,31 |
| 9 | 120,80 | 27 583,95 | 8 390,00 | 1 966,32 | 37 940,27 |
| 10 | 135,90 | 24 718,69 | 7 046,90 | 0 | 31 765,59 |
| | | | | | $\Sigma=517\,491,39$ |

Fuente: elaboración propia.

4.3. Determinación de cargas y momentos por sismo

Para el cálculo del corte basal, se usará el código UBC 1 997, y se utilizarán los siguientes datos: tipo de suelo S_E , zona sísmica 4, falla tipo B, distancia a la fuente del sismo 10 km.

4.3.1. Cálculo del período de vibración y corte basal

El período de una estructura es el tiempo que ésta toma en dar un ciclo completo cuando experimenta vibración no forzada. Para una chimenea industrial de concreto reforzado, el período se calcula mediante:

$$T = \frac{5 H^2}{d \bar{(b)}} \sqrt{\frac{\rho_{ck}}{E_c} \frac{t(h)}{t(b)}}^{0,3}$$

de la tabla III:

$$\bar{d} \bar{(b)} = \frac{11,62' + 10,28'}{2} = 10,95'$$

$$E_c = 57\,000 \sqrt{4\,000 \text{ psi}} \frac{12^2}{1\,000} = 519\,119,5 \text{ kip/pie}^2$$

entonces:

$$T = \frac{5 \cdot 151'^2}{10,95'} \sqrt{\frac{0,0046 \text{ kip s}^2/\text{pie}^4}{519\,119,5 \text{ kip/pie}^2} \frac{8''}{8''}}^{0,3} = 0,98 \text{ s}$$

Según el código UBC 1 997, el corte basal no deberá ser menor que:

$$V = 0,56 C_a I_E W$$

De donde, según las tablas 16-Q y 16-S del código UBC 1 997:

$$N_a = 1,0$$
$$C_a = 0,36N_a = 0,36 \cdot 1 = 0,36$$

Por lo que:

$$V = 0,56(0,36)(1,25)(517\,491,39 \text{ lb}) = 130\,407,83 \text{ lb}$$

Además, en zona sísmica 4, el corte basal no deberá ser menor a:

$$V = 1,6ZN_v I_E W / R$$

De donde, según la tabla 16-T y 16-P del código UBC 1997:

$$N_v = 1,0$$
$$R = 3,6$$

Por lo que:

$$V = 1,6(0,4)(1,0)(1,25)(517\,491,39 \text{ lb})/3,6 = 114\,998,09 \text{ lb}$$

El corte basal de la chimenea es el mayor de los dos: $V = 130\,407,83 \text{ lb}$

4.3.2. Distribución vertical de fuerzas

Según el ACI 307-79, se debe considerar el 15 por ciento del corte basal, concentrado en la punta de la chimenea, mientras que el 85 por ciento restante, se deberá distribuir verticalmente (ver tabla VI).

Tabla VI. **Distribución vertical de fuerzas**

| Sección | Altura al centro de la sección * h (pies) | W _h (lb) | W _h h | F _h (lb) |
|---------|--|---------------------|-------------------|---------------------|
| 1 | 7,55 | 69 640,81 | 525 788,13 | 1 722,19 |
| 2 | 22,65 | 65 432,45 | 1 482 045,08 | 4 854,36 |
| 3 | 37,75 | 64 489,27 | 2 434 469,79 | 7 973,98 |
| 4 | 52,85 | 57 015,74 | 3 013 281,77 | 9 869,85 |
| 5 | 67,95 | 55 635,99 | 3 780 465,55 | 12 382,72 |
| 6 | 83,05 | 48 599,02 | 4 036 148,84 | 13 220,19 |
| 7 | 98,15 | 46 789,93 | 4 592 432,11 | 15 042,27 |
| 8 | 113,25 | 40 182,31 | 4 550 646,29 | 14 905,40 |
| 9 | 128,35 | 37 940,27 | 4 869 633,58 | 15 950,23 |
| 10 | 143,45 | 31 765,59 | 4 556 774,12 | 14 925,47 |
| | | | Σ = 33 841 685,25 | |

Fuente: elaboración propia.

*punto de aplicación de fuerza lateral, a la altura media de la sección.

En la tabla VI, la distribución vertical de fuerzas F, se calculó así:

$$F_h = \frac{0,85V W_h h}{W_h h}$$

Donde:

$$15\%V = 0,15(130\,407,83 \text{ lb}) = 19\,561,17 \text{ lb}$$

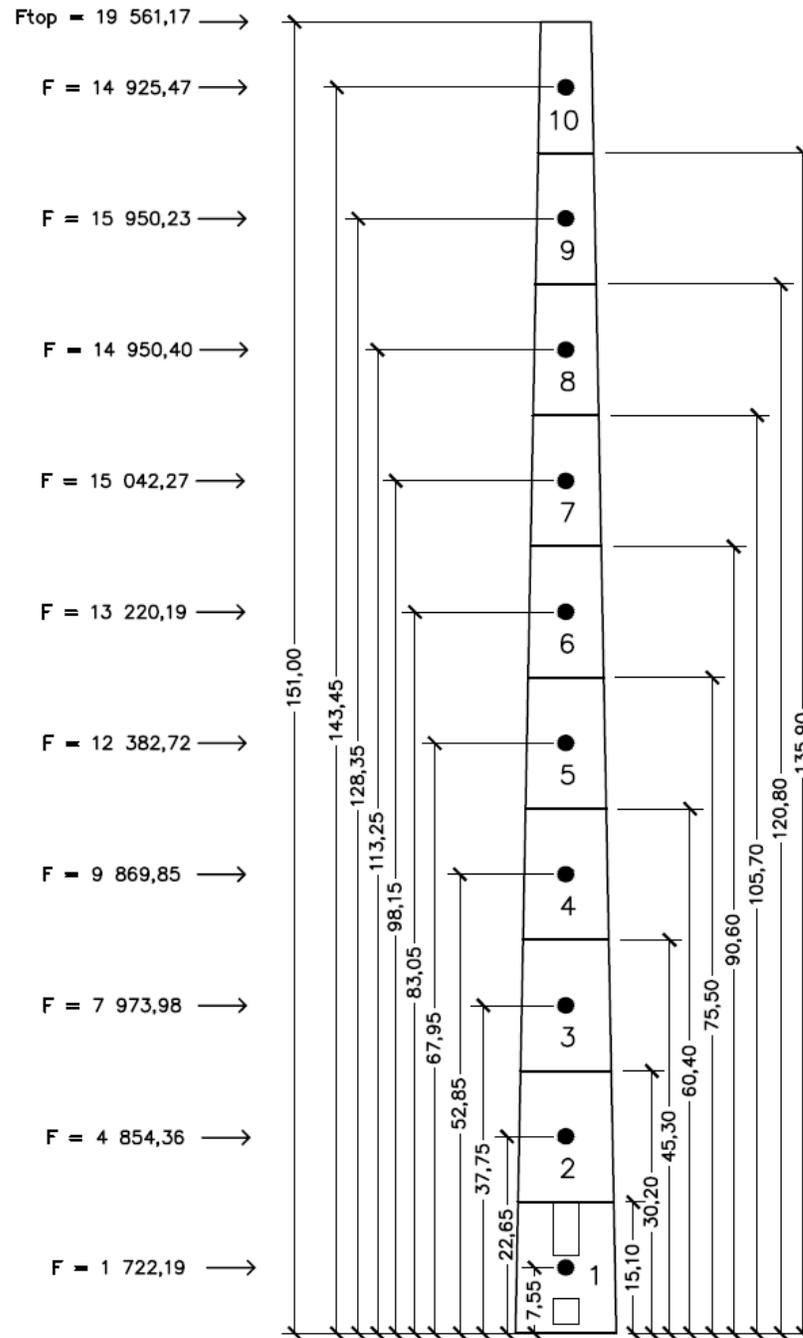
$$85\%V = 0,85(130\,407,83 \text{ lb}) = 110\,846,66 \text{ lb}$$

Por ejemplo, para la sección 1:

$$F_h = \frac{110\,846,66 \text{ lb} (525\,788,13)}{33\,841\,685,25} = 1\,722,19 \text{ lb}$$

Las fuerzas F, actúan en el centro de cada sección, esto se muestra en la figura 27, donde las fuerzas están dadas en libras y las distancias en pies.

Figura 27. Distribución vertical de fuerzas



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

4.3.3. Cálculo de los momentos por sismo

Una vez calculadas las fuerzas laterales por sismo, que actúan en la chimenea, se deben calcular los momentos que ellas producen. El ACI 307-79 indica que los momentos por sismo, se calculan mediante:

$$M_x = Jx \cdot 0,15V(H-h_x) + F_h (h-h_x)$$

Donde:

$$J_x = J + (1-J) \frac{h_x^3}{H^3}$$

$$J = \frac{0,6}{\frac{3}{T}} = \frac{0,6}{\frac{3}{0,98}} = 0,60$$

Tabla VII. Momentos por sismo para cada sección

| Sección | Altura a la base de la sección h_x (pies) | F_h (lb) | Altura al centro de la sección h (pies) | h_x/H | J_x | M_x (kip pie) |
|---------|---|------------|---|---------|-------|-----------------|
| 1 | 0 | 1 722,19 | 7,55 | 0,00 | 0,60 | 7 914,83 |
| 2 | 15,1 | 4 854,36 | 22,65 | 0,10 | 0,60 | 6 745,63 |
| 3 | 30,2 | 7 973,98 | 37,75 | 0,20 | 0,61 | 5 597,23 |
| 4 | 45,3 | 9 869,85 | 52,85 | 0,30 | 0,61 | 4 592,65 |
| 5 | 60,4 | 12 382,72 | 67,95 | 0,40 | 0,63 | 3 563,70 |
| 6 | 75,5 | 13 220,19 | 83,05 | 0,50 | 0,65 | 2 819,19 |
| 7 | 90,6 | 15 042,27 | 98,15 | 0,60 | 0,69 | 2 056,05 |
| 8 | 105,7 | 14 905,40 | 113,25 | 0,70 | 0,74 | 1 415,60 |
| 9 | 120,8 | 15 950,23 | 128,35 | 0,80 | 0,81 | 844,42 |
| 10 | 135,9 | 14 925,47 | 143,45 | 0,90 | 0,89 | 363,83 |

Fuente: elaboración propia.

Los momentos calculados, se muestran en la tabla VII. Por ejemplo, para la sección 9, según dicha tabla y la figura 27, el momento es:

$$M_{120,8'} = 0,81[19\ 561,17\ \text{lb}(151'-120,8')+15\ 950,23\ \text{lb}(128,35'-120,8') + 14\ 925,47\ \text{lb}(143,45'-120,8')]/1000 = 844,42\ \text{kip pie}$$

Nota: en los cálculos anteriores, así como en el resto de los cálculos desarrollados en este capítulo, se ha trabajado con todos los decimales. Si los cálculos se hacen con los datos mostrados, los resultados varían un poco.

4.4. Diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión

Para llevar a cabo este diseño, es necesario conocer los momentos M por sismo (E) y las cargas verticales D por peso propio que soporta cada sección, así como el radio medio r de cada una (ver tabla VIII).

Tabla VIII. Datos para el diseño por flexo-compresión

| Sección | M (kip pie) | D (lb) | r (pulg) |
|---------|-------------|------------|----------|
| 1 | 7 914,83 | 517 491,39 | 63,88 |
| 2 | 6 745,63 | 447 850,57 | 60,26 |
| 3 | 5 597,23 | 382 418,12 | 56,63 |
| 4 | 4 592,65 | 317 928,85 | 53,01 |
| 5 | 3 563,70 | 260 913,12 | 49,38 |
| 6 | 2 819,19 | 205 277,13 | 45,76 |
| 7 | 2 056,05 | 156 678,10 | 42,14 |
| 8 | 1 415,60 | 109 888,17 | 38,51 |
| 9 | 844,42 | 69 705,86 | 34,89 |
| 10 | 363,83 | 31 765,59 | 31,26 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VIII la carga vertical D que soporta cada sección, viene siendo para una sección cualquiera, el peso de las secciones superiores a ella, más el peso de la propia sección. El radio medio de la sección se obtiene al dividir

dentro de dos el promedio de los diámetros mostrados en la tabla III. Por ejemplo para la sección 1, el radio medio es:

$$r = [(11,62' + 10,28' + 11,01' + 9,68')/4](12"/2) = 63,88"$$

- Diseño de la sección 1:

Para el diseño de cada una de las secciones, se utilizará un $f'c = 4\ 000$ libras por pulgada cuadrada y un $f_y = 60\ 000$ libras por pulgada cuadrada. La combinación de cargas a usar, por ser la más crítica, es: $U_v = 0,9 D + 1,0 E + 1,2 T$.

Según el ACI 307-08, el primer paso consiste en proponer una cuantía, empezando por el mínimo: $\rho_t = 0,0025$. El segundo paso, es determinar por ensayo y error, el valor de α que satisface la ecuación:

$$\frac{P_u}{r t f_c} = K_1 = 1,7 Q \lambda + 2 \epsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2 \omega_t \lambda_1$$

En donde P_u es la carga vertical, de la Tabla VIII, factorada (multiplicada por 0,9) según la combinación de cargas:

$$P_u = 0,9 D = 0,9(517\ 491,39\ \text{lb}) = 465\ 742,25\ \text{lb}$$

Ya que la carga vertical por sismo y el efecto de temperatura tienden a cero. Por lo que:

$$\frac{465\ 742,25\ \text{lb}}{63,88''(8'' (4\ 000\ \text{psi}))} = 0,228 = K_1 = 1,7 Q \lambda + 2 \epsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2 \omega_t \lambda_1$$

Asumiendo que:

$$\rho_t = 0,0025$$
$$\alpha = 25^\circ (0,436 \text{ rad}):$$

De la tabla II:

$$Q = -1,345 + 0,2018\alpha - 0,004434\alpha^2 + 15,83 - 1,676\alpha + 0,03994\alpha^2 \text{ (t/r)}$$
$$= -1,345 + 0,2018 \cdot 25 - 0,004434 \cdot 25^2 + 15,83 - 1,676 \cdot 25 + 0,03994 \cdot 25^2 \frac{8''}{63,88''}$$
$$Q = 0,790$$

$$K_e = \frac{E_s}{f_y} = \frac{29\,000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}} = 483,333$$

$$\omega_t = \rho_t \frac{f_y}{f_c} = 0,0025 \frac{60\,000 \text{ psi}}{4\,000 \text{ psi}} = 0,038$$

$$\varepsilon_m = 0,07 \frac{1 - \cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \leq 0,003$$
$$= 0,07 \frac{1 - \cos 0,436}{1 + \cos 0,436} = 0,0034 \leq 0,003 \rightarrow \text{usar } 0,003$$

$$\cos \tau = 1 - \beta_1 \quad 1 - \cos \alpha = 1 - 0,85 \quad 1 - \cos 0,436 = 0,920$$

$$\tau = \cos^{-1} 0,920 = 0,401 \text{ rad}$$

$$\cos \psi = \cos \alpha - \frac{1 - \cos \alpha}{\epsilon_m} \frac{f_y}{E_s} \geq -1$$

$$\cos \psi = \cos 0,436 - \frac{1 - \cos 0,436}{0,003} \frac{60}{29000} = 0,842 \geq -1 \quad \text{ok}$$

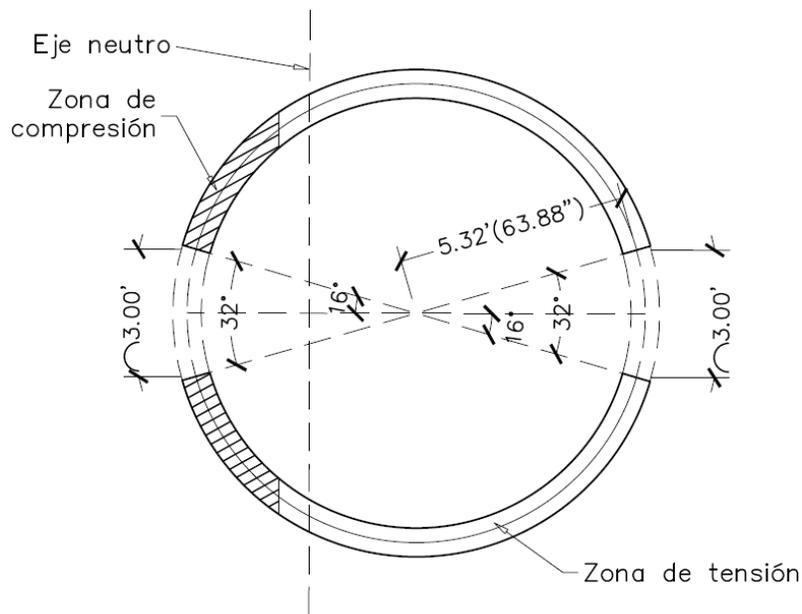
$$\psi = \cos^{-1} 0,842 = 0,570 \text{ rad}$$

$$\cos \mu = \cos \alpha + \frac{1 - \cos \alpha}{\epsilon_m} \frac{f_y}{E_s} \leq 1$$

$$\cos \mu = \cos 0,436 + \frac{1 - \cos 0,436}{0,003} \frac{60}{29000} = 0,971 \leq 1 \quad \text{ok}$$

$$\mu = \cos^{-1} 0,971 = 0,242 \text{ rad}$$

Figura 28. **Aberturas en la sección 1 de la chimenea**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Nótese que β denota la mitad del ángulo que forma la abertura en una sección. En la figura 28, se aprecian dos aberturas, las que se deben a la presencia de la entrada de humos y la puerta de limpieza. Ambas aberturas poseen el mismo ancho (3 pies), donde $\beta = 16$ grados (0,28 radianes). Para efecto de análisis, el caso mostrado en la figura, es el más crítico, en donde una abertura ($n_1=1$) se encuentra en la zona de compresión (porción sombreada) y la otra en zona de tensión. La abertura en zona de compresión, se localiza en la fibra extrema a compresión, afectando mayormente la resistencia de la sección. Continuando:

$$\lambda = \tau - n_1 \beta$$

$$\lambda = 0,401 \text{ rad} - 1 \cdot 0,280 \text{ rad} = 0,122 \text{ rad}$$

Obsérvese que se toma n_1 se toma igual a 1 porque se está considerando sólo una abertura en zona de compresión.

$$Q_1 = \frac{\sin \psi - \sin \mu - \psi - \mu \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

$$= \frac{\sin 0,57 - \sin 0,242 - 0,570 - 0,242 \cos 0,436}{1 - \cos 0,436} = 0,029$$

$$\lambda_1 = \mu + \psi - \pi$$

$$\lambda_1 = 0,242 + 0,570 - \pi = -2,329 \text{ rad}$$

Regresando a la ecuación general, se tiene que:

$$\frac{P_u}{rtf c} = K_1 = 1,7 Q \lambda + 2 \epsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2 \omega_t \lambda_1$$

$$0,228 = K_1 = 1,7 \cdot 0,790 \cdot 0,122 + 2 \cdot 0,003 \cdot 483,333 \cdot 0,038 \cdot 0,029$$

$$+ 2 \cdot 0,038 \cdot -2,329 = 0,008$$

Observe que 0,228 no es igual a 0,008. Esto significa que el valor asumido de α no es el correcto, por lo que se deberá modificar.

Se comienza aumentando el ángulo de 25 grados a 28 grados y el resultado tampoco es satisfactorio, por lo que también se ensaya un ángulo de 30 grados y luego uno de 33 grados, y este último casi hace que la ecuación se satisfaga. Aumentando el ángulo en fracciones de grado, se establece que para satisfacer la ecuación α debe ser 33,55 grados. Por lo tanto si se continúa con la cuantía de acero propuesta al inicio (0,0025) y el ángulo obtenido (33,55 grados):

$$\rho_t = 0,0025$$

$$\alpha = 33,55^\circ (0,586 \text{ rad}):$$

De la Tabla II:

$$Q = 0,993 - 0,00258\alpha + (-3,27 + 0,0862\alpha)(t/r)$$

$$= 0,993 - 0,00258 * 33,55 + -3,27 + 0,0862 * 33,55 \quad 8''/63,88'' = 0,859$$

$$K_e = \frac{29\,000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}} = 483,333$$

$$\omega_t = 0,0025 \frac{60\,000 \text{ psi}}{4\,000 \text{ psi}} = 0,038$$

$$\varepsilon_m = 0,07 \frac{1 - \cos 0,587}{1 + \cos 0,587} = 0,0064 \leq 0,003 \rightarrow \text{usar } 0,003$$

$$\cos \tau = 1 - 0,85 \cdot 1 - \cos 0,587 = 0,858$$

$$\tau = \cos^{-1} 0,858 = 0,538 \text{ rad}$$

$$\cos \psi = \cos 0,587 - \frac{1 - \cos 0,587}{0,003} \cdot \frac{60}{29000} = 0,717 \geq -1 \quad \text{ok}$$

$$\psi = \cos^{-1} 0,717 = 0,769 \text{ rad}$$

$$\cos \mu = \cos 0,587 + \frac{1 - \cos 0,587}{0,003} \cdot \frac{60}{29000} = 0,948 \leq 1 \quad \text{ok}$$

$$\mu = \cos^{-1} 0,948 = 0,323 \text{ rad}$$

$$\lambda = 0,538 \text{ rad} - 1 \cdot 0,280 \text{ rad} = 0,258 \text{ rad}$$

$$Q_1 = \frac{\sin 0,769 - \sin 0,323 - 0,769 - 0,323 \cdot \cos 0,587}{1 - \cos 0,587} = 0,038$$

$$\lambda_1 = 0,323 + 0,769 - \pi = -2,049 \text{ rad}$$

Regresando a la ecuación general, se tiene que:

$$\frac{P_u}{r t f c} = K_1 = 1,7 Q \lambda + 2 \varepsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2 \omega_t \lambda_1$$

$$0,228 = K_1 = 1,7 \cdot 0,859 \cdot 0,258 + 2 \cdot 0,003 \cdot 483,333 \cdot 0,038 + 2 \cdot 0,038 \cdot -2,049 = 0,228$$

Ahora se puede observar que sí hay una igualdad de los dos lados de la ecuación, por lo que el valor obtenido de α es el adecuado. Sin embargo, esto no significa que la sección vaya a resistir el momento último por sismo, ya que el momento nominal de la sección, depende de la cuantía de acero.

Conociendo que $\alpha = 33,55$ grados y $\rho_t = 0,0025$, se puede proceder al paso 3, que, según ACI 307-08, consiste en encontrar el momento nominal de la sección M_n :

$$\frac{M_n}{P_{ur}} = K_3 = \cos \alpha + \frac{K_2}{K_1}$$

Para resolver la ecuación anterior hay que obtener otras variables que se analizan a continuación y básicamente son para obtener K_2 ya que K_1 se conoce (0,228):

$$\zeta = 4 \cos \alpha (\sin \alpha + \sin \psi - \sin \mu)$$

$$\zeta = 4 \cos 0,587 (\sin 0,587 + \sin 0,769 - \sin 0,323) = 3,104$$

$$Q_2 = \frac{\psi - \mu \quad 1 + 2\cos^2 \alpha + 0,5 \quad 4 \sin 2\alpha + \sin 2\psi - \sin 2\mu - \zeta}{1 - \cos \alpha}$$

$$= 0,025$$

$$K = \sin \psi + \sin \mu + \pi - \psi - \mu \quad \cos \alpha$$

$$= \sin 0,769 + \sin 0,323 + \pi - 0,769 - 0,323 \quad \cos 0,587 = 2,720$$

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \sin \tau - \tau - n_1 \beta \cos \alpha - \frac{n_1}{2} \sin (\gamma + \beta) - \sin (\gamma - \beta) \\ &= \sin 0,538 - 0,538 - 1 * 0,28 \cos 0,587 - \frac{1}{2} \sin (0 + 0,28) - \sin (0 - 0,28) \\ &= 0,021\end{aligned}$$

Observe que $\gamma = 0$, ya que sólo hay una abertura en zona de compresión.

$$\begin{aligned}K_2 &= 1,7Q\bar{R} + \varepsilon_m K_e \omega_t Q_2 + 2\omega_t K \\ &= 1,7 \cdot 0,859 \cdot 0,021 + 0,003 \cdot 483,33 \cdot 0,0375 \cdot 0,025 + 2 \cdot 0,0375 \cdot 2,72 \\ &= 0,236\end{aligned}$$

Regresando a la ecuación general del momento nominal:

$$\begin{aligned}\frac{M_n}{P_u r} &= K_3 = \cos \alpha + \frac{K_2}{K_1} \\ \frac{M_n}{(465\,742,25 \text{ lb})(63,88'')} &= K_3 = \cos 0,587 + \frac{0,236}{0,228} \\ \frac{M_n}{29\,751\,614,93 \text{ lb in}} &= K_3 = 1,867 \\ M_n &= 1,867 \cdot 29\,751\,614,93 \text{ lb in} = 55\,546\,265,07 \text{ lb in}\end{aligned}$$

Entonces el momento (ϕM_n) que resiste la sección es:

$$\phi M_n = 0,8(55\,546\,265,07 \text{ lb-pulg}) = 44\,437\,012,06 \text{ lb-pulg} = 3703,08 \text{ kip-pie}$$

En tanto que el momento último actuante M_u por sismo (E), según la tabla VIII, y según la combinación de cargas, es:

$$\begin{aligned}M_u &= 1,0E = 1,0(7\,914,83 \text{ kip-pie}) = 7\,914,83 \text{ kip-pie} \\ M_u &= 7\,914,83 \text{ kip-pie}\end{aligned}$$

Recordar que este momento es debido únicamente a sismo, ya que los momentos por peso propio y temperatura, tienden a cero.

Como $\phi M_n < M_u$, el ACI 307-08 indica que se debe incrementar el valor de la cuantía ρ_t hasta que $\phi M_n \geq M_u$. Esto conlleva a repetir todo el proceso, desde el primer paso.

Para este proceso de nuevo, hay que iterar probando con diferentes cuantías y ángulos, hasta obtener el resultado requerido. Después de varios ensayos, con los valores para $\rho_t = 0,0096$ y $\alpha = 45,65$ grados, se obtiene un resultado satisfactorio. Es importante hacer notar que estos valores no son los únicos que satisfacen el requerimiento $\phi M_n \geq M_u$. Continuando:

$$\rho_t = 0,0096$$
$$\alpha = 45,65^\circ (0,797 \text{ rad})$$

De la tabla II:

$$Q=0,89$$

$$K_e = \frac{29\,000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}} = 483,333$$

$$\omega_t = 0,0095 \frac{60\,000 \text{ psi}}{4\,000 \text{ psi}} = 0,144$$

$$\epsilon_m = 0,07 \frac{1 - \cos 0,761}{1 + \cos 0,761} = 0,012 \leq 0,003 \rightarrow \text{usar } 0,003$$

$$\cos \tau = 1 - 0,85 \cdot 1 - \cos 0,797 = 0,744$$

$$\tau = \cos^{-1} 0,744 = 0,731 \text{ rad}$$

$$\cos \psi = \cos 0,797 - \frac{1 - \cos 0,797}{0,003} \cdot \frac{60}{29000} = 0,491 \geq -1 \quad \text{ok}$$

$$\psi = \cos^{-1} 0,491 = 1,057 \text{ rad}$$

$$\cos \mu = \cos 0,797 + \frac{1 - \cos 0,797}{0,003} \cdot \frac{60}{29000} = 0,907 \leq 1 \quad \text{ok}$$

$$\mu = \cos^{-1} 0,907 = 0,436 \text{ rad}$$

$$\lambda = 0,731 \text{ rad} - 1 \cdot 0,280 \text{ rad} = 0,451 \text{ rad}$$

$$Q_1 = \frac{\sin 1,057 - \sin 0,436 - 1,057 - 0,436 \cdot \cos 0,797}{1-7} = 0,048$$

$$\lambda_1 = 0,436 + 1,057 - \pi = -1,649 \text{ rad}$$

Regresando a la ecuación general, se tiene que:

$$\frac{P_u}{r t f c} = K_1 = 1,7 Q \lambda + 2 \varepsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2 \omega_t \lambda_1$$

$$0,228 = K_1 = 1,7 \cdot 0,89 \cdot 0,451 + 2 \cdot 0,003 \cdot 483,333 \cdot 0,144 + 0,048 + 2 \cdot 0,144 \cdot -1,649 = 0,228$$

Como hay una igualdad de los dos lados de la ecuación, el valor asumido de α es el adecuado. Ahora se debe proceder a calcular nuevamente el momento nominal de la sección:

Recordar la forma como se obtuvo K_2 :

$$\zeta = 4 \cos 0,797 (\sin 0,797 + \sin 1,057 - \sin 0,436) = 3,255$$

$$K = \sin 1,057 + \sin 0,436 + \pi - 1,057 - 0,436 \cos 0,797 = 2,446$$

$$Q_2 = \frac{\psi - \mu \frac{1 + 2\cos^2 \alpha}{1 - \cos \alpha} + 0,5 \frac{4 \sin 2\alpha + \sin 2\psi - \sin 2\mu - \zeta}{1 - \cos \alpha}}{1 - \cos \alpha} = 0,063$$

$$\bar{R} = \sin 0,731 - 0,731 - 1 * 0,28 \cos 0,797 - \frac{1}{2} (\sin (0 + 0,28) - \sin (0 - 0,28)) = 0,076$$

$$K_2 = 1,7 \cdot 0,89 \cdot 0,076 + 0,003 \cdot 483,333 \cdot 0,144 \cdot 0,063 + 2 \cdot 0,144 \cdot 2,446 = 0,832$$

Regresando a la ecuación general del momento nominal:

$$\frac{M_n}{P_{u,r}} = K_3 = \cos \alpha + \frac{K_2}{K_1}$$

$$\frac{M_n}{(465\,742,25\text{ lb})(63,88\text{''})} = K_3 = \cos 0,797 + \frac{0,832}{0,228}$$

$$\frac{M_n}{29\,751\,614,93\text{ lb in}} = K_3 = 4,352$$

$$M_n = 4,352(29\,751\,614,93\text{ lb pulg}) = 129\,498\,460\text{ lb pulg} = 10\,791,54\text{ kip pie}$$

Entonces el momento (ϕM_n) que resiste la sección es:

$$\phi M_n = 0,8(10\,791,54\text{ kip-pie}) = 8\,633,23\text{ kip pie}$$

En tanto que el momento último actuante es: $M_u = 7\,914,83\text{ kip pie}$

Como $\phi M_n > M_u$, la sección sí resiste el momento al que se ve sometido, por lo que el valor de la cuantía $\rho_t = 0,0096$, es adecuado.

De la misma forma en que se hizo el cálculo para el diseño de la sección 1, se realiza para las secciones restantes. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla IX. Observe que los momentos resistentes de cada sección, son mayores a los momentos últimos actuantes ($\phi M_n > M_u$).

En la tabla XXIV (apéndices), se puede encontrar una comparación entre el método que establece el ACI 307-08 y el método del Dr. Rumman Wadi, para el diseño del refuerzo vertical de la chimenea por flexo-compresión, en donde se puede apreciar que este último método, ofrece resultados similares al del código ACI 307-08.

Tabla IX. **Resumen de cálculo de cuantías verticales totales por flexo-compresión**

| Variable | Sección 1 | Sección 2 | Sección 3 | Sección 4 | Sección 5 |
|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P_u (lb) | 465 742,25 | 403 065,51 | 344 176,31 | 286 135,97 | 234 821,81 |
| r (pulg) | 63,88 | 60,26 | 56,63 | 53,01 | 49,38 |
| t (pulg) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| $K_1 = P_u/rtf'c$ | 0,228 | 0,209 | 0,190 | 0,168 | 0,150 |
| ρ_t | 0,0096 | 0,0083 | 0,0079 | 0,0074 | 0,0070 |
| α° (rad) | 45,65° (0,797) | 31,57° (0,551) | 30,56° (0,533) | 29,30° (0,511) | 28,26° (0,493) |
| Q | 0,89 | 0,839 | 0,824 | 0,805 | 0,785 |
| K_e | 483,333 | 483,333 | 483,333 | 483,333 | 483,333 |
| ω_t | 0,144 | 0,125 | 0,119 | 0,111 | 0,105 |
| ε_m | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| τ (rad) | 0,731 | 0,507 | 0,491 | 0,471 | 0,454 |
| ψ (rad) | 1,057 | 0,722 | 0,699 | 0,670 | 0,646 |
| μ (rad) | 0,436 | 0,304 | 0,295 | 0,283 | 0,273 |
| β (rad) | 0,280 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| n_1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| λ | 0,451 | 0,507 | 0,491 | 0,471 | 0,454 |
| Q_1 | 0,048 | 0,036 | 0,035 | 0,033 | 0,032 |
| λ_1 | -1,649 | -2,115 | -2,148 | -2,189 | -2,223 |
| K_1 | 0,228 | 0,209 | 0,190 | 0,168 | 0,150 |
| ζ | 3,255 | 3,018 | 2,967 | 2,900 | 2,839 |
| Q_2 | 0,062 | 0,021 | 0,019 | 0,017 | 0,015 |
| K | 2,446 | 2,763 | 2,783 | 2,809 | 2,829 |
| γ (rad) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \bar{R} | 0,076 | 0,054 | 0,049 | 0,043 | 0,039 |
| K_2 | 0,832 | 0,768 | 0,731 | 0,685 | 0,648 |
| K_3 | 4,352 | 4,527 | 4,71 | 4,934 | 5,242 |
| $\emptyset M_n$ (kip pie) | 8 633,23 | 7 329,68 | 6 121,26 | 4 989,04 | 4 051,96 |
| M_u (kip pie) | 7 914,83 | 6 745,63 | 5 597,23 | 4 592,65 | 3 563,70 |

Fuente elaboración propia.

Continuación de la tabla IX.

| Variable | Sección 6 | Sección 7 | Sección 8 | Sección 9 | Sección 10 |
|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| P_u (lb) | 184 749,42 | 141 010,29 | 98 899,35 | 62 735,27 | 28 589,03 |
| r (pulg) | 45,76 | 42,14 | 38,51 | 34,89 | 31,26 |
| t (pulg) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| $K_1 = P_u/rtf^2c$ | 0,126 | 0,105 | 0,080 | 0,056 | 0,029 |
| ρ_t | 0,0063 | 0,0055 | 0,0046 | 0,0036 | 0,0025 |
| α° (rad) | 26,62° (0,465) | 24,84° (0,434) | 23,36° (0,408) | 21,40° (0,374) | 1,53° (0,027) |
| Q | 0,754 | 0,712 | 0,632 | 0,543 | 5,909 |
| K_e | 483,333 | 483,333 | 483,333 | 483,333 | 483,333 |
| ω_t | 0,095 | 0,083 | 0,069 | 0,054 | 0,038 |
| ε_m | 0,003 | 0,003 | 0,0029 | 0,0025 | $1,25 \cdot 10^{-5}$ |
| τ (rad) | 0,428 | 0,399 | 0,375 | 0,344 | 0,025 |
| ψ (rad) | 0,608 | 0,567 | 0,532 | 0,507 | 0,347 |
| μ (rad) | 0,257 | 0,240 | 0,225 | 0,154 | 0,00 |
| β (rad) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| n_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| λ | 0,428 | 0,399 | 0,375 | 0,344 | 0,025 |
| Q_1 | 0,031 | 0,029 | 0,027 | 0,050 | -18,998 |
| λ_1 | -2,277 | -2,334 | -2,383 | -2,480 | -2,795 |
| K_1 | 0,126 | 0,105 | 0,080 | 0,056 | 0,029 |
| ζ | 2,735 | 2,610 | 2,501 | 2,597 | 1,465 |
| Q_2 | 0,013 | 0,010 | 0,009 | 0,012 | 1,355 |
| K | 2,861 | 2,893 | 2,919 | 2,949 | 3,134 |
| γ (rad) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \bar{R} | 0,032 | 0,026 | 0,022 | 0,017 | $6,29 \cdot 10^{-6}$ |
| K_2 | 0,584 | 0,511 | 0,427 | 0,335 | 0,235 |
| K_3 | 5,522 | 5,790 | 6,244 | 6,891 | 9,237 |
| $\emptyset M_n$ (kip pie) | 3 112,41 | 2 293,48 | 1 585,49 | 1 005,49 | 550,43 |
| M_u (kip pie) | 2 819,19 | 2 056,05 | 1 415,60 | 844,42 | 363,83 |

Fuente elaboración propia.

Ahora que ya se conocen las cuantías verticales totales (ρ_t) por sección, se puede proceder a establecer el armado de cada una. El ACI 307-08, dice que la cuantía de refuerzo vertical en la cara exterior, debe ser como mínimo igual a $0,5\rho_t$. En este caso se utilizará $0,67\rho_t$.

Tabla X. **Armado del refuerzo vertical por flexo-compresión**

| Sección | Cuantía de refuerzo vertical total ρ_t | Cuantía de refuerzo vertical exterior $0,67\rho_t$ | Cuantía de refuerzo vertical interior $0,33\rho_t$ | Armado de refuerzo vertical exterior | Armado de refuerzo vertical interior |
|---------|--|---|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,0096 | 0,0064 | 0,0032 | núm.6 @ 8½" | núm.6 @ 17" |
| 2 | 0,0083 | 0,0056 | 0,0027 | núm.6 @ 10" | núm.6 @ 20" |
| 3 | 0,0079 | 0,0053 | 0,0026 | núm.6 @ 10½" | núm.6 @ 21" |
| 4 | 0,0074 | 0,0050 | 0,0024 | núm.6 @ 11" | núm.6 @ 22½" |
| 5 | 0,0070 | 0,0047 | 0,0023 | núm.5 @ 8" | núm.5 @ 16½" |
| 6 | 0,0063 | 0,0042 | 0,0021 | núm.5 @ 9" | núm.5 @ 18½" |
| 7 | 0,0055 | 0,0037 | 0,0018 | núm.5 @ 10½" | núm.5 @ 21" |
| 8 | 0,0046 | 0,0031 | 0,0015 | núm.4 @ 7½" | núm.4 @ 15½" |
| 9 | 0,0036 | 0,0024 | 0,0012 | núm.4 @ 10" | núm.4 @ 20" |
| 10 | 0,0025 | 0,0017 | 0,0008 | núm.4 @ 12" | núm.4 @ 24" |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla X, se puede observar el armado del refuerzo vertical, interior y exterior, de cada sección. Este se determinó, considerando un tramo de 12 pulgadas de longitud, mediante la siguiente ecuación:

$$esp = \frac{12''}{12'' t \rho / a_{vr}}$$

Por ejemplo para la sección 1, utilizando varilla núm.6 ($a_{vr} = 0,44 \text{ pulg}^2$):

Armado de refuerzo vertical exterior:

$$esp = \frac{12''}{12'' \cdot 0,0064 / 0,44 \text{ pulg}^2} = 8,59'' \approx 8,5''$$

$$= \text{núm.6 @ 8,5''}$$

Armado de refuerzo vertical interior:

$$\text{esp} = \frac{12''}{12'' \cdot 8'' \cdot 0,0032 / 0,44 \text{ pulg}^2} = 17,19'' \approx 17''$$

=núm.6 @ 17''

Recuerde que el ACI 307-08, establece que el espaciamiento máximo para refuerzo vertical exterior, es 12 pulgadas y para refuerzo vertical interior, es 24 pulgadas.

4.5. Cálculo de los esfuerzos térmicos verticales

Debido a la exposición térmica de las chimeneas, la variación de la temperatura a través del muro, reduce la resistencia nominal de las secciones de la chimenea. Para el cálculo de los esfuerzos de térmicos verticales, se utilizarán los siguientes datos:

- Consumo de combustible de la industria (W_c) = 1 000 kg/h (0,28 kg/s)
- Razón de gases producidos (U_{ge}) = 12 kg/kg de combustible
- Temperatura del gas, (T_i) = 400°F (205°C)
- Temperatura mínima del aire que rodea la chimenea (T_o) = 50°F (10°C)

De acuerdo a registros consultados y en horas de la madrugada.

4.5.1. Velocidad del gas en las distintas secciones

Como ya se conocen las medidas de los diámetros interiores del revestimiento (ducto), presentadas en la tabla IV, se pueden obtener las velocidades en cada una de las secciones de la chimenea. Para ello se necesita conocer el caudal que circula por la chimenea.

El caudal se calculará tal y como se indicó en el capítulo 2 del presente trabajo de investigación.

- Determinando el caudal de gases que circulará por la chimenea

$$Q_m = W_c U_{ge}$$

$$= \frac{0,28 \text{ kg de combustible}}{\text{s}} \frac{12 \text{ kg}}{\text{kg de combustible}} = 3,36 \text{ kg/s}$$

- Determinando las velocidades en cada sección

Ahora que se conoce el caudal del gas, se pueden obtener las velocidades en cada sección, tal y como se indicó en el capítulo 2 a partir de la siguiente ecuación considerando que $\rho_o = 1,3 \text{ kg/m}^3$ (ver tabla XI):

$$d_{bi} = \frac{\sqrt{4Q_m(273+T_i)}}{273\pi \text{ vel } \rho_o} \rightarrow \text{vel} = \frac{4Q_m(273+T_i)}{273\pi \rho_o d_{bi}^2}$$

Tabla XI. **Velocidad del gas en cada sección**

| Sección | d_{bi} (pies) | vel (m/s) | vel (pies/s) |
|---------|-----------------|-----------|--------------|
| 1 | 7,93 | 0,99 | 3,24 |
| 2 | 7,32 | 1,16 | 3,80 |
| 3 | 6,72 | 1,38 | 4,51 |
| 4 | 6,12 | 1,66 | 5,45 |
| 5 | 5,51 | 2,04 | 6,70 |
| 6 | 4,91 | 2,58 | 8,46 |
| 7 | 4,30 | 3,35 | 11,00 |
| 8 | 3,70 | 4,54 | 14,88 |
| 9 | 3,10 | 6,48 | 21,25 |
| 10 | 2,49 | 10,00 | 32,80 |

Fuente: elaboración propia.

Observar que la velocidad en la sección 10 que es de 10 metros por segundo, que viene siendo la velocidad de salida de los gases, es adecuada, ya que anda entre 5 y 15 metros por segundo. Si esta no se encontrara dentro del rango, se debe proceder a cambiar el diámetro superior de la chimenea, hasta que se obtenga un resultado adecuado.

4.5.2. Gradientes térmicos

Como la chimenea a diseñar cuenta con revestimiento y con espacio para ventilación, los gradientes térmicos (T_x) por sección se calculan a partir de la siguiente ecuación:

Tabla XII. **Gradientes térmicos de cada sección**

| Variable | Sección 1 | Sección 2 | Sección 3 | Sección 4 | Sección 5 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T_i (°F) | 400,00 | 400,00 | 400,00 | 400,00 | 400,00 |
| T_o (°F) | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 |
| t (pulg) | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 |
| t_b (pulg) | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 |
| r_q | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| C_c (Btu pulg/pie ² h °F) | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 |
| C_b (Btu pulg/pie ² h °F) | 11,20 | 11,20 | 11,20 | 11,20 | 11,20 |
| K_i (Btu/pie ² /h/ °F) | 2,50 | 2,50 | 2,60 | 2,60 | 2,60 |
| K_o (Btu/pie ² /h/ °F) | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 |
| K_s (Btu/pie ² /h/ °F) | 2,67 | 2,67 | 2,67 | 2,67 | 2,67 |
| d_{bi} (pies) | 7,93 | 7,32 | 6,72 | 6,12 | 5,51 |
| d_b (pies) | 8,31 | 7,70 | 7,09 | 6,48 | 5,87 |
| d_s (pies) | 9,18 | 8,57 | 7,97 | 7,36 | 6,75 |
| d_c (pies) | 10,34 | 9,74 | 9,14 | 8,53 | 7,93 |
| d_{co} (pies) | 11,01 | 10,41 | 9,80 | 9,20 | 8,60 |
| T_x (°F) | 72,48 | 71,55 | 71,44 | 70,32 | 68,90 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de la tabla XII.

| Variable | Sección 6 | Sección 7 | Sección 8 | Sección 9 | Sección 10 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T _i (°F) | 400,00 | 400,00 | 400,00 | 400,00 | 400,00 |
| T _o (°F) | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 |
| t (pulg) | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 |
| t _b (pulg) | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,50 |
| r _q | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| C _c (Btu pulg/pie ² h °F) | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 |
| C _b (Btu pulg/pie ² h °F) | 11,20 | 11,20 | 11,20 | 11,20 | 11,20 |
| K _i (Btu/pie ² /h/ °F) | 2,70 | 3,00 | 3,10 | 3,60 | 4,20 |
| K _o (Btu/pie ² /h/ °F) | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 |
| K _s (Btu/pie ² /h/ °F) | 2,67 | 2,67 | 2,67 | 2,67 | 2,67 |
| d _{bi} (pies) | 4,91 | 4,30 | 3,70 | 3,10 | 2,49 |
| d _b (pies) | 5,27 | 4,66 | 4,06 | 3,45 | 2,85 |
| d _s (pies) | 6,15 | 5,54 | 4,94 | 4,33 | 3,73 |
| d _c (pies) | 7,33 | 6,72 | 6,11 | 5,51 | 4,91 |
| d _{co} (pies) | 7,99 | 7,39 | 6,78 | 6,18 | 5,58 |
| T_x (°F) | 68,15 | 68,46 | 66,84 | 66,66 | 65,37 |

Fuente: elaboración propia.

$$T_x = \frac{td_{bi}}{C_c d_c} \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{r_q K_i} + \frac{t_b d_{bi}}{r_q C_b d_b} + \frac{d_{bi}}{K_s d_s} + \frac{td_{bi}}{C_c d_c} + \frac{d_{bi}}{K_o d_{co}}}$$

En la ecuación anterior K_i, se obtiene a partir de las velocidades anteriormente calculadas y de la figura 45 (anexos) . Los diámetros d_{bi}, d_c, d_b, d_s, y d_{co}, se obtienen de las tablas III y IV. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla XII.

Hay que recordar que, a menos que se realicen estudios completos del equilibrio térmico para cada chimenea en particular, el ACI 307-08 permite utilizar constantes: r_q = 0,5, C_c = 12, C_b = 11,2 (conductividad térmica del ladrillo refractario que se puede encontrar en Guatemala), K_o = 12, y K_s = T_i / 150.

4.5.3. Esfuerzos térmicos verticales

Al diseñar una chimenea industrial de concreto reforzado, los efectos térmicos se consideran como una reducción de la resistencia de los materiales de construcción (acero y concreto). Las ecuaciones a utilizar, para el cálculo de estos esfuerzos reductores, son:

$$f_{CTV}'' = \alpha_{te} c T_x E_c$$

$$f_{STV}'' = \alpha_{te} (c-1+\gamma_2) T_x n E_c$$

$$f_{STV} = \alpha_{te} (\gamma_2-2) T_x E_s$$

Donde:

$$\alpha_{te} = 6,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ F$$

$$c = -\rho n \gamma_1 + 1 + \frac{\rho n \gamma_1 + 1}{\rho n \gamma_1 + 1} + 2\rho n \gamma_2 + \gamma_1(1-\gamma_2)$$

ρ = cuantía de refuerzo vertical exterior (ver tabla X)

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{29\,000 \text{ ksi}}{57\,400 \text{ psi}} = \frac{29\,000 \text{ ksi}}{3\,605 \text{ ksi}} = 8$$

$$\gamma_1 = \frac{\text{cuantía de refuerzo vertical interior}}{\text{cuantía de refuerzo vertical exterior}} = \frac{0,33 \rho_t}{0,67 \rho_t} = 0,50$$

Considerando un recubrimiento de 2 pulgadas, varilla núm.3 para el refuerzo circunferencial y varilla núm.4 para refuerzo vertical:

$$Y_2 = \frac{8'' - 2'' - 3/8'' - (4/8'')/2}{8''} = 0,67$$

Los resultados se muestran en la tabla XIII:

Tabla XIII. **Esfuerzos térmicos verticales por sección**

| Sección | T _x (°F) | c | f'' _{CTV} (psi) | f'' _{STV} (psi) | f _{STV} (psi) |
|---------|---------------------|--------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 72,48 | 0,2260 | 383,82 | -1 420,96 | 6 066,15 |
| 2 | 71,55 | 0,2149 | 360,34 | -1 552,31 | 6 138,21 |
| 3 | 71,44 | 0,2104 | 352,30 | -1 610,17 | 6 189,05 |
| 4 | 70,32 | 0,2058 | 339,08 | -1 646,79 | 6 153,81 |
| 5 | 68,90 | 0,2009 | 324,33 | -1 676,93 | 6 092,80 |
| 6 | 68,15 | 0,1922 | 306,95 | -1 770,27 | 6 138,22 |
| 7 | 68,46 | 0,1827 | 293,12 | -1 900,43 | 6 287,90 |
| 8 | 66,84 | 0,1701 | 266,34 | -2 014,91 | 6 298,37 |
| 9 | 66,66 | 0,1529 | 238,85 | -2 224,94 | 6 496,92 |
| 10 | 65,37 | 0,1320 | 202,18 | -2 439,82 | 6 629,30 |

Fuente: elaboración propia.

4.5.4. Modificaciones a f'c y fy para diseño del refuerzo vertical

Una vez conocidos los esfuerzos térmicos verticales, se pueden hacer las modificaciones; tanto para la resistencia del concreto (f'c = 4 000 psi) como en la resistencia del acero (fy = 60 000 psi), mediante las siguientes ecuaciones:

$$f''_{c v} = f'_{c} - 1,2f''_{CTV}$$

$$f'_{y(v)} = f_y - \frac{1,2}{1 + \gamma_1} (f_{STV} - f''_{STV})$$

En donde 1,2 es el factor de carga por temperatura, según la combinación de cargas que se está utilizando (0,9 D + 1,0 E + 1,2 T).

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla XIV:

Tabla XIV. **Modificaciones a $f'c$ y f_y para cada sección para diseño del refuerzo vertical**

| Sección | $f'c$ (v) (psi) | f_y (v) (psi) |
|---------|--------------------|--------------------|
| 1 | 3 539,42 | 54 578,70 |
| 2 | 3 567,59 | 54 468,50 |
| 3 | 3 577,24 | 54 404,69 |
| 4 | 3 593,11 | 54 418,24 |
| 5 | 3 610,80 | 54 455,00 |
| 6 | 3 631,66 | 54 381,31 |
| 7 | 3 648,25 | 54 209,50 |
| 8 | 3 680,39 | 54 155,34 |
| 9 | 3 713,38 | 53 912,49 |
| 10 | 3 757,38 | 53 720,63 |

Fuente: elaboración propia.

4.6. Diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión y temperatura

El diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión y temperatura, se realiza de la misma forma que para el diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión, sustituyendo $f'c$ por $f'c$ (v) y f_y por f_y (v).

Para llevar a cabo el diseño, se partirá de las cuantías que se obtuvieron anteriormente en el diseño del refuerzo vertical por flexo-compresión. Dichas cuantías se mantendrán vigentes si la sección analizada resiste las necesidades térmicas, de sismo y peso propio, de lo contrario se modificarán. Recordar que la combinación de cargas es: 0,9 D + 1,0 E + 1,2 T.

- Diseño de la sección 1

Del diseño del refuerzo por flexo-compresión (tabla IX), se tienen los siguientes datos:

$$P_u = 465\,742,25 \text{ lb}$$

$$r = 63,88''$$

$$\rho_t = 0,0096$$

$$f'_c(v) = 3\,539,42 \text{ psi}$$

$$f_y(v) = 54\,578,70 \text{ psi}$$

$$M_u = 7\,780,97 \text{ kip pie}$$

Tras varias iteraciones, se determinó que $\alpha = 46,80^\circ$ (0,817 rad)

De la tabla II:

$$Q=0,89$$

$$K_e = \frac{E_s}{f_y(v)} = \frac{29\,000\,000 \text{ psi}}{54\,578,70 \text{ psi}} = 531,343$$

$$\omega_t = \rho_t \frac{f_y(v)}{f'_c(v)} = 0,0096 \frac{54\,578,70 \text{ psi}}{3\,539,42 \text{ psi}} = 0,148$$

$$\varepsilon_m = 0,07 \frac{1 - \cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \leq 0,003$$

$$= 0,07 \frac{1 - \cos 0,817}{1 + \cos 0,817} = 0,013 \leq 0,003, \quad \text{usar } 0,003$$

$$\cos \tau = 1 - \beta_1 \quad 1 - \cos \alpha = 1 - 0,85 \quad 1 - \cos 0,817 = 0,732$$

$$\tau = \cos^{-1} 0,732 = 0,749 \text{ rad}$$

$$\cos \psi = \cos \alpha - \frac{1 - \cos \alpha}{\epsilon_m} \frac{f_y(v)}{E_s} \geq -1$$

$$\cos \psi = \cos 0,817 - \frac{1 - \cos 0,817}{0,003} \frac{54\,578,70}{29\,000\,000} = 0,487 \geq -1 \quad \text{ok}$$

$$\psi = \cos^{-1} 0,487 = 1,063 \text{ rad}$$

$$\cos \mu = \cos \alpha + \frac{1 - \cos \alpha}{\epsilon_m} \frac{f_y}{E_s} < 1$$

$$\cos \mu = \cos 0,817 + \frac{1 - \cos 0,817}{0,003} \frac{54\,578,70}{29\,000\,000} = 0,882 \leq 1 \quad \text{ok}$$

$$\mu = \cos^{-1} 0,882 = 0,490 \text{ rad}$$

$$\lambda = \tau - n_1 \beta$$

$$\lambda = 0,749 \text{ rad} - 1 \cdot 0,280 \text{ rad} = 0,470 \text{ rad}$$

$$Q_1 = \frac{\sin \psi - \sin \mu - \psi - \mu \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

$$= \frac{\sin 1,063 - \sin 0,490 - 1,063 - 0,490 \cos 0,817}{1 - \cos 0,817} = 0,035$$

$$\lambda_1 = \mu + \psi - \pi$$

$$\lambda_1 = 0,490 + 1,063 - \pi = -1,589 \text{ rad}$$

Regresando a la ecuación general de carga vertical, se tiene que:

$$\frac{P_u}{rtf c(v)} = K_1 = 1,7Q\lambda + 2\varepsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2\omega_t \lambda_1$$

$$\frac{465\,742,25 \text{ lb}}{63,88''(8'')3\,539,42 \text{ psi}} = 0,257 = K_1$$

$$0,257 = K_1 = 1,7 \cdot 0,89 \cdot 0,470 + 2 \cdot 0,003 \cdot 531,343 \cdot 0,148 \cdot 0,035 + 2(0,148)(-1,589)$$

$$0,257 = K_1 = 0,257$$

Como los dos lados de la ecuación general de carga axial son iguales, el valor de α es el correcto. Ahora hay que proceder a calcular el momento nominal de la sección.

$$\zeta = 4 \cos \alpha (\sin \alpha + \sin \psi - \sin \mu)$$

$$\zeta = 4 \cos 0,817 (\sin 0,817 + \sin 1,063 - \sin 0,490) = 3,100$$

$$Q_2 = \frac{\psi - \mu \cdot 1 + 2\cos^2 \alpha + 0,5 \cdot 4 \sin 2\alpha + \sin 2\psi - \sin 2\mu - \zeta}{1 - \cos \alpha}$$

$$= 0,050$$

$$K = \sin \psi + \sin \mu + \pi - \psi - \mu \cdot \cos \alpha$$

$$= \sin 1,063 + \sin 0,490 + \pi - 1,063 - 0,490 \cdot \cos 0,817 = 2,432$$

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \sin \tau - \tau - n_1 \beta \cos \alpha - \frac{n_1}{2} \sin (\gamma + \beta) - \sin (\gamma - \beta) \\ &= \sin 0,749 - 0,749 - 1 * 0,28 \cos 0,817 - \frac{1}{2} \sin (0 + 0,28) - \sin (0 - 0,28) \\ &= 0,084\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_2 &= 1,7Q\bar{R} + \varepsilon_m K_e \omega_t Q_2 + 2\omega_t K \\ &= 1,7 \cdot 0,89 \cdot 0,084 + 0,003 \cdot 531,343 \cdot 0,148 \cdot 0,050 + 2 \cdot 0,148 \cdot 2,432 \\ &= 0,858\end{aligned}$$

De la ecuación general del momento nominal:

$$\frac{M_n}{P_u r} = K_3 = \cos \alpha + \frac{K_2}{K_1}, \quad M_n = P_u r K_3$$

$$\frac{M_n}{(465 \, 742,25 \text{ lb})(63,88'')} = K_3 = \cos 0,817 + \frac{0,858}{0,257}$$

$$\frac{M_n}{29 \, 751 \, 614,93 \text{ lb in}} = K_3 = 4,017$$

$$M_n = 4,017(29 \, 751 \, 614,93 \text{ lb pulg}) = 119 \, 517 \, 818 \text{ lb pulg} = 9 \, 959,82 \text{ kip pie}$$

Entonces el momento último (ϕM_n) que resiste la sección es:

$$\phi M_n = 0,8(9 \, 959,82 \text{ kip-pie})$$

$$\phi M_n = 7 \, 967,85 \text{ kip-pie}$$

En tanto que el momento último actuante M_u , según la tabla VIII, es:

$$M_u = 7 \, 914,83 \text{ kip-pie}$$

Como $\phi M_n > M_u$, la sección 1, sí resiste la combinación de cargas por peso propio, sismo y temperatura, a las que se ve sometida, por lo que el valor asumido de la cuantía, $\rho_t = 0,0096$, sigue siendo adecuado.

Si se llegara a dar el caso de que $\phi M_n < M_u$, se tendrá que aumentar la cuantía de refuerzo hasta que $\phi M_n \geq M_u$.

El diseño del resto de las secciones se realiza de la misma manera que la sección 1. En la tabla XV, se muestran los resultados obtenidos.

En la tabla XXV (apéndices), se muestra una comparación entre los momentos resistentes de cada sección, calculados mediante las distintas combinaciones de cargas que establece el ACI 307-08, en donde se demuestra que la combinación más crítica es $0,9 D + 1,0 E + 1,2 T$, que, como se recordará, es con la que se ha venido trabajando el ejemplo de diseño.

Tabla XV. **Resumen de cálculo de cuantía verticales totales por flexo-compresión y temperatura**

| Variable | Sección 1 | Sección 2 | Sección 3 | Sección 4 | Sección 5 |
|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P_u (lb) | 465 742,25 | 403 065,51 | 344 176,31 | 286 135,97 | 234 821,81 |
| r (pulg) | 63,88 | 60,26 | 56,63 | 53,01 | 49,38 |
| t (pulg) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| $f'c(v)$ (psi) | 3 539,42 | 3 567,59 | 3 577,24 | 3 593,11 | 3 610,80 |
| $f'y(v)$ (psi) | 54 578,70 | 54 468,50 | 54 404,69 | 54 418,24 | 54 455,00 |
| $K_1 = P_u/rtf'c$ | 0,257 | 0,234 | 0,212 | 0,188 | 0,165 |
| ρ_t | 0,0096 | 0,0083 | 0,0079 | 0,0074 | 0,0070 |
| α° (rad) | 46,80° (0,817) | 32,40° (0,565) | 31,26° (0,546) | 29,90° (0,522) | 28,74° (0,502) |
| Q | 0,89 | 0,846 | 0,831 | 0,811 | 0,790 |
| K_e | 531,343 | 532,418 | 533,042 | 532,910 | 532,550 |
| ω_t | 0,148 | 0,127 | 0,120 | 0,112 | 0,106 |
| ε_m | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| τ (rad) | 0,749 | 0,520 | 0,502 | 0,480 | 0,462 |
| ψ (rad) | 1,063 | 0,727 | 0,701 | 0,670 | 0,644 |
| μ (rad) | 0,490 | 0,343 | 0,331 | 0,317 | 0,305 |
| β (rad) | 0,280 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| n_1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| λ | 0,470 | 0,520 | 0,502 | 0,480 | 0,462 |
| Q_1 | 0,035 | 0,026 | 0,025 | 0,024 | 0,023 |
| λ_1 | -1,589 | -2,071 | -2,109 | -2,154 | -2,193 |
| K_1 | 0,257 | 0,234 | 0,212 | 0,188 | 0,165 |
| ζ | 3,100 | 2,920 | 2,868 | 2,802 | 2,740 |
| Q_2 | 0,050 | 0,016 | 0,015 | 0,013 | 0,011 |
| K | 2,432 | 2,750 | 2,773 | 2,800 | 2,823 |
| γ (rad) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \bar{R} | 0,084 | 0,058 | 0,052 | 0,046 | 0,041 |
| K_2 | 0,858 | 0,783 | 0,743 | 0,693 | 0,653 |
| K_3 | 4,017 | 4,187 | 4,353 | 4,557 | 4,841 |
| $\emptyset M_n$ (kip-pie) | 7 967,85 | 6 779,61 | 5 655,82 | 4 608,28 | 3 742,95 |
| M_u (kip-pie) | 7 914,83 | 6 745,63 | 5 597,23 | 4 592,65 | 3 563,70 |

Fuente elaboración propia.

Continuación de la tabla XV.

| Variable | Sección 6 | Sección 7 | Sección 8 | Sección 9 | Sección 10 |
|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| P_u (lb) | 184 749,42 | 141 010,29 | 98 899,35 | 62 735,27 | 28 589,03 |
| r (pulg) | 45,76 | 42,14 | 38,51 | 34,89 | 31,26 |
| t (pulg) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| $f'c$ (v) | 3 631,66 | 3 648,25 | 3 680,39 | 3 713,38 | 3 757,38 |
| $f'y$ (v) | 54 381,31 | 54 209,50 | 54 155,34 | 53 912,49 | 53 720,63 |
| $K_1 = P_u/rtf'c$ | 0,139 | 0,115 | 0,087 | 0,061 | 0,030 |
| ρ_t | 0,0063 | 0,0055 | 0,0046 | 0,0036 | 0,0025 |
| α° (rad) | 26,93° (0,470) | 24,95° (0,435) | 23,37° (0,408) | 21,25° (0,371) | 1,42° (0,025) |
| Q | 0,758 | 0,716 | 0,632 | 0,540 | 6,156 |
| K_e | 533,271 | 534,962 | 535,497 | 537,909 | 539,830 |
| ω_t | 0,094 | 0,082 | 0,068 | 0,052 | 0,036 |
| ε_m | 0,003 | 0,003 | 0,0029 | 0,0025 | $1,08 \cdot 10^{-5}$ |
| τ (rad) | 0,433 | 0,401 | 0,376 | 0,342 | 0,023 |
| ψ (rad) | 0,603 | 0,558 | 0,522 | 0,493 | 0,328 |
| μ (rad) | 0,286 | 0,266 | 0,249 | 0,183 | 0,00 |
| β (rad) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| n_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| λ | 0,433 | 0,401 | 0,376 | 0,342 | 0,023 |
| Q_1 | 0,022 | 0,020 | 0,019 | 0,035 | -18,674 |
| λ_1 | -2,253 | -2,318 | -2,370 | -2,465 | -2,814 |
| K_1 | 0,139 | 0,115 | 0,087 | 0,061 | 0,030 |
| ζ | 2,630 | 2,496 | 2,382 | 2,439 | 1,386 |
| Q_2 | 0,009 | 0,007 | 0,006 | 0,009 | 1,192 |
| K | 2,858 | 2,894 | 2,921 | 2,953 | 3,135 |
| γ (rad) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| \bar{R} | 0,034 | 0,027 | 0,022 | 0,017 | $5,03 \cdot 10^{-6}$ |
| K_2 | 0,584 | 0,507 | 0,420 | 0,325 | 0,224 |
| K_3 | 5,093 | 5,324 | 5,731 | 6,294 | 8,376 |
| $\emptyset M_n$ (kip-pie) | 2 870,21 | 2 109,02 | 1 455,33 | 918,38 | 499,12 |
| M_u (kip-pie) | 2 819,19 | 2 056,05 | 1 415,60 | 844,42 | 363,83 |

Fuente: elaboración propia.

Ahora que ya se conocen las cuantías verticales totales (ρ_t), por sección, se puede proceder a establecer el armado final de cada una. Como no se hizo ningún cambio a las cuantías utilizadas para el diseño por flexo-compresión, el armado seguirá siendo el que se había establecido anteriormente.

Tabla XVI. **Armado del refuerzo vertical por flexo-compresión y temperatura**

| Sección | Cuantía de refuerzo vertical total ρ_t | Cuantía de refuerzo vertical exterior $0,67\rho_t$ | Cuantía de refuerzo vertical interior $0,33\rho_t$ | Armado de refuerzo vertical exterior | Armado de refuerzo vertical interior |
|---------|--|---|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,0096 | 0,0064 | 0,0032 | núm.6 @ 8½" | núm.6 @ 17" |
| 2 | 0,0083 | 0,0056 | 0,0027 | núm.6 @ 10" | núm.6 @ 20" |
| 3 | 0,0079 | 0,0053 | 0,0026 | núm.6 @ 10½" | núm.6 @ 21" |
| 4 | 0,0074 | 0,0050 | 0,0024 | núm.6 @ 11" | núm.6 @ 22½" |
| 5 | 0,0070 | 0,0047 | 0,0023 | núm.5 @ 8" | núm.5 @ 16½" |
| 6 | 0,0063 | 0,0042 | 0,0021 | núm.5 @ 9" | núm.5 @ 18½" |
| 7 | 0,0055 | 0,0037 | 0,0018 | núm.5 @ 10½" | núm.5 @ 21" |
| 8 | 0,0046 | 0,0031 | 0,0015 | núm.4 @ 7½" | núm.4 @ 15½" |
| 9 | 0,0036 | 0,0024 | 0,0012 | núm.4 @ 10" | núm.4 @ 20" |
| 10 | 0,0025 | 0,0017 | 0,0008 | núm.4 @ 12" | núm.4 @ 24" |

Fuente: elaboración propia.

4.7. Diseño del refuerzo circunferencial por viento

Para el diseño del refuerzo circunferencial, se utilizarán los siguientes datos (ver sección 3.5.2, de este trabajo de investigación), así como la Norma AGIES NSE 2-10:

- $v = 70$ mph (112,70 km/h, basado en la figura 47 de la sección anexos)
- $I = 1,15$
- $K_d = 0,95$

4.7.1. Cálculo de los momentos circunferenciales

Previo al cálculo del refuerzo circunferencial, es necesario determinar los momentos por flexión circunferencial, según el procedimiento indicado en la sección 3.5.2, de este trabajo de investigación.

La velocidad de diseño es:

$$V_r = (I)^{0,5} v = 1,15^{0,5} 70 \text{ mph} = 75,07 \text{ mph}$$

En tanto que las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

$$\bar{V}(z) = 1,47 V_r \frac{z}{33}^{0,154} \quad (0,65)$$

$$\bar{p}(z) = 0,00119 K_d [\bar{V}(z)]^2$$

$$Gr_z = 4 - 0,8 \log_{10} z = 4 \quad \text{para } z < 1 \text{ pie}$$

$$pr_z = \bar{p} z Gr(z)$$

$$M_i(z) = 0,31 pr(z) r(z)^2$$

$$M_o(z) = 0,27 pr(z) r(z)^2$$

Los resultados se muestran en la tabla XVII:

Tabla XVII. **Momentos circunferenciales por sección**

| Sección | z (pies) | $\bar{V}(z)$ pies/s | $\bar{p}(z)$ lb/pie ² | Gr(z) | pr(z) lb/pie ² | r(z) pies | M _i (z) lb pie/pie | M _o (z) lb pie/pie |
|---------|----------|------------------------|-------------------------------------|-------|------------------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 15,10 | 63,59 | 4,57 | 3,06 | 13,97 | 5,17 | 115,89 | 100,94 |
| 2 | 30,20 | 70,75 | 5,66 | 2,82 | 15,94 | 4,87 | 117,19 | 102,07 |
| 3 | 45,30 | 75,31 | 6,41 | 2,68 | 17,15 | 4,57 | 110,98 | 96,66 |
| 4 | 60,40 | 78,72 | 7,01 | 2,58 | 18,04 | 4,27 | 101,80 | 88,67 |
| 5 | 75,50 | 81,48 | 7,50 | 2,50 | 18,74 | 3,96 | 91,32 | 79,54 |
| 6 | 90,60 | 83,80 | 7,94 | 2,43 | 19,32 | 3,66 | 80,35 | 69,98 |
| 7 | 105,70 | 85,81 | 8,32 | 2,38 | 19,82 | 3,36 | 69,37 | 60,42 |
| 8 | 120,80 | 87,59 | 8,67 | 2,33 | 20,25 | 3,06 | 58,71 | 51,13 |
| 9 | 135,90 | 89,20 | 8,99 | 2,29 | 20,63 | 2,76 | 48,58 | 42,31 |
| 10a | 142,63 | 89,86 | 9,13 | 2,28 | 20,78 | 2,62 | 44,31 | 38,59 |
| 10b | 151,00 | 90,65 | 9,29 | 2,26 | 31,45 | 2,45 | 58,73 | 50,97 |

Fuente: elaboración propia.

Observe que en esta tabla, la sección 10 se ha dividido en dos (10a y 10b). La sección 10b, se refiere al tramo limitado por la punta de la chimenea y una distancia de $1,5 d(h) = 1,5 * 5,58$ pies = 8,37 pies, mientras que la sección 10a, se refiere al tramo limitado por la sección 9 y la sección 10b. Dicha división de secciones, se debe a que la presión pr(z) se incrementa en un 50 por ciento para el tramo limitado por la punta de la chimenea y una distancia de $1,5 d(h)$ de ella.

4.7.2. Diseño del refuerzo

El ACI 307-08 establece que el diseño del refuerzo circunferencial se realizará como una viga horizontal. Por lo que se utilizará la siguiente ecuación, además de los requerimientos del código ACI 318-08:

$$M_u = \phi A_s f_y d - \frac{A_s f_y}{1,7 f'_c b_w}$$

Utilizando un recubrimiento de 2 pulgadas, y varilla núm.3, se tiene que:

$$d = 8" - 2" - (3/8")/2 = 5,81"$$

La combinación de cargas a utilizar es:

$$U_c = 1,2 T + 1,4 W$$

En este momento para la combinación de cargas, no se tienen datos del efecto que produce la temperatura, por lo que para la primera aproximación sólo se trabajará con los datos del viento. Recordar que más adelante, cuando se conozcan los efectos de la temperatura, también se reducirán los valores de la resistencia del concreto y del acero y se le harán los chequeos correspondientes con estos valores.

- Análisis de la capacidad de resistir momento flexionante en ambas caras de la sección, por pie de altura (base), como viga horizontal sometida a flexión:

Se tienen los siguientes datos:

$$b_w = 12"$$

$$d = 5,81"$$

$$f'_c = 4\,000 \text{ psi}$$

$$f_y = 60\,000 \text{ psi}$$

$$\rho_{\min} = 0,001 \text{ para amabas caras (según ACI 307-08, sección 4.4.2)}$$

$$A_{s_{\min}} = \rho_{\min} b_w d = 0,001(12")(5,81") = 0,07 \text{ pulg}^2$$

Esta área mínima, equivale a núm.3 @ 18 pulgadas, sin embargo recordar que existe un mínimo para la separación entre las varillas, sección 4.4.2 del ACI 307-08

$$M_{\min} = \phi A_{s_{\min}} f_y d - \frac{A_{s_{\min}} f_y}{1,7 f'c b_w}$$

$$= 0,9 \cdot 0,07 \cdot 60\,000 \cdot 5,81 - \frac{0,07 \cdot 60\,000}{1,7 \cdot 4\,000 \cdot 12} \cdot \frac{1}{12} = 1\,814,24 \text{ lb pie/pie}$$

$$A_{s_{\max}} = 0,5 \rho_b b_w d$$

En donde, según ACI 318-08, sección B.8.4.2:

$$\rho_b = \frac{0,85 \beta_1 f'c}{f_y} \frac{87\,000}{87\,000 + f_y} = \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 4\,000}{60\,000} \frac{87\,000}{87\,000 + 60\,000} = 0,0285$$

$$A_{s_{\max}} = 0,5 \cdot 0,0285 \cdot (12")(5,81") = 1 \text{ pulg}^2$$

$$M_{\max} = \phi A_{s_{\max}} f_y d - \frac{A_{s_{\max}} f_y}{1,7 f'c b_w}$$

$$= 0,9 \cdot 1 \cdot 60\,000 \cdot 5,81 - \frac{1 \cdot 60\,000}{1,7 \cdot 4\,000 \cdot 12} \cdot \frac{1}{12} = 22\,836 \text{ lb pie/pie}$$

Observar que, aunque a los momentos mostrados en la tabla XVII se les aplicara el factor de 1,4 de la combinación de cargas ($U_c = 1,4W + 1,2T$), estos seguirían siendo muy inferiores al momento mínimo. Por tal motivo se procederá a armar todas las secciones con el armado mínimo, que es, según ACI 307-08, sección 4.4.2:

Refuerzo interior → núm.3 @ 12"

Refuerzo exterior → núm.3 @ 12" ó t (8") → núm.3 @ 8"

El armado del refuerzo de cada sección, se muestra en la tabla XVIII. Observe que nuevamente se ha dividido la sección 10 en dos (10a' y 10b'). La sección 10b' corresponde al tramo limitado por la punta de la chimenea y una distancia igual al mayor de: $0,2d(h) = 0,2(5,58 \text{ pies}) = 1,11 \text{ pies}$, o 7,5 pies. Mientras que la sección 10a' corresponde al tramo limitado por la sección 9 y 10b'. Dicha separación de secciones, se debe a que en el tramo limitado por la punta de la chimenea y una distancia de 7,5 pies en este caso, por requerimiento del ACI 307-08, la cuantía de acero se duplica en cada cara, y además, la separación entre varillas se limita al menor de: la mitad del espesor del muro (4 pulgadas) o 6 pulgadas; 4 pulgadas en este caso.

Además en la misma tabla, se muestran las cuantías de acero circunferencial por pie de altura, a partir del espaciamiento adoptado, calculado mediante:

$$\rho = \frac{12''}{\text{esp}} \frac{a_{vr}}{12'' t}$$

Donde:

- esp = espaciamiento entre varillas
- a_{vr} = área de varilla (0,11 pulg² para varilla núm.3)
- t = espesor del muro (8")

Se recuerda que en esta instancia, se busca el valor de la cuantía de refuerzo circunferencial ρ para cada sección de la chimenea, ver tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Armado del refuerzo circunferencial por flexión**

| Sección | Cuantía de refuerzo circunferencial exterior (ρ') | Cuantía de refuerzo circunferencial interior | Armado del refuerzo exterior | Armado del refuerzo interior |
|---------|--|--|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 2 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 3 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 4 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 5 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 6 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 7 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 8 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 9 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 10a' | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 10b' | 0,0034 | 0,0034 | núm.3 @ 4" | núm.3 @ 4" |

Fuente: elaboración propia.

4.8. **Diseño del refuerzo circunferencial por flexión y temperatura**

El refuerzo, anteriormente determinado, no es definitivo, puesto que únicamente se ha considerado la acción del viento. Recordar que la temperatura disminuye la resistencia nominal de las secciones de la chimenea.

4.8.1. **Cálculo de los esfuerzos térmicos circunferenciales**

Al igual que para el refuerzo vertical, se deben calcular esfuerzos que produce la temperatura, los cuales servirán para disminuir la resistencia de los materiales de construcción (acero y concreto). Las ecuaciones a utilizar son:

$$f_{CTC} \text{ (esfuerzo en el concreto en la cara interior)} = \alpha_{te} c' T_x E_c$$

$$f_{STC} \text{ (esfuerzo en el acero en la cara exterior)} = \alpha_{te} (\gamma_2' - c') T_x E_s$$

Donde:

T_x = gradiente térmico (ver tabla XII)

$$\alpha_{te} = 6,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{F}$$

$$c' = -\rho'n \gamma_1' + 1 + \rho'n \gamma_1' + 1^2 + 2\rho'n \gamma_2' + \gamma_1'(1 - \gamma_2')$$

ρ' = cuantía de refuerzo circunferencial exterior (ver Tabla XVIII)

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{29\,000 \text{ ksi}}{57\,400 \text{ psi}} = \frac{29\,000 \text{ ksi}}{3\,605 \text{ ksi}} = 8$$

$$\gamma_1' = \frac{\text{cuantía de refuerzo circunferencial interior}}{\text{cuantía de refuerzo circunferencial exterior}} \quad (\text{ver tabla XVIII})$$

Considerando un recubrimiento de 2 pulgadas, y varilla núm.3 para el refuerzo circunferencial:

$$\gamma_2' = \frac{8'' - 2'' - (3/8'')/2}{8''} = 0,73$$

Los resultados se muestran en la tabla XIX:

Tabla XIX. **Esfuerzos térmicos circunferenciales por sección**

| Sección | T_x (°F) | γ_1' | c' | f'_{CTC} (psi) | f_{STC} (psi) |
|---------|------------|-------------|-------|------------------|-----------------|
| 1 | 72,48 | 0,647 | 0,136 | 231,08 | 8 114,69 |
| 2 | 71,55 | 0,647 | 0,136 | 228,12 | 8 010,57 |
| 3 | 71,44 | 0,647 | 0,136 | 227,77 | 7 998,26 |
| 4 | 70,32 | 0,647 | 0,136 | 224,20 | 7 871,87 |
| 5 | 68,90 | 0,647 | 0,136 | 219,67 | 7 713,89 |
| 6 | 68,15 | 0,647 | 0,136 | 217,28 | 7 629,92 |
| 7 | 68,46 | 0,647 | 0,136 | 218,27 | 7 664,62 |
| 8 | 66,84 | 0,647 | 0,136 | 213,10 | 7 483,25 |
| 9 | 66,66 | 0,647 | 0,136 | 212,53 | 7 463,10 |
| 10a' | 65,37 | 0,647 | 0,136 | 208,41 | 7 318,68 |
| 10b' | 65,37 | 1,000 | 0,185 | 283,53 | 6 714,41 |

Fuente: elaboración propia.

4.8.2. Modificaciones a f'_c y f_y para diseño del refuerzo circunferencial

Una vez conocidos los esfuerzos térmicos circunferenciales, se pueden hacer las modificaciones, tanto para la resistencia del concreto ($f'_c = 4\ 000$ psi) como en la resistencia del acero ($f_y = 60\ 000$ psi), mediante las siguientes ecuaciones:

$$f''_c = f'_c - 1,2f''_{CTC}$$

$$f'_y(c) = f_y - 1,2f_{STC}$$

Note que en estas ecuaciones, el factor 1,2 corresponde al factor por carga térmica de la combinación de cargas ($U_c = 1,2T + 1,4W$). Los resultados se muestran en la tabla XX:

Tabla XX. **Modificaciones a f'_c y f_y para cada sección para diseño del refuerzo circunferencial**

| Sección | f'_c (c) (psi) | f'_y (c) (psi) |
|---------|---------------------|---------------------|
| 1 | 3 722,70 | 50 262,37 |
| 2 | 3 726,26 | 50 387,31 |
| 3 | 3 726,68 | 50 402,09 |
| 4 | 3 730,97 | 50 552,56 |
| 5 | 3 736,40 | 50 743,34 |
| 6 | 3 739,27 | 50 844,10 |
| 7 | 3 738,08 | 50 802,45 |
| 8 | 3 744,28 | 51 020,10 |
| 9 | 3 744,97 | 51 044,28 |
| 10a' | 3 749,90 | 51 217,59 |
| 10b' | 3 659,76 | 51 942,70 |

Fuente: elaboración propia.

4.8.3. Diseño del refuerzo

Para el diseño del refuerzo circunferencial por flexión y temperatura, el procedimiento es el mismo que se utilizó anteriormente. La única diferencia, es que se sustituirá $f'c$ por $f'c(c)$ y f_y por $f'y(c)$. Los momentos siguen siendo los que se obtuvieron anteriormente (ver tabla XVII). La ecuación a utilizar es:

$$M_u = \phi A_s f'y(c) d - \frac{A_s f'y(c)}{1,7 f'c(c) b_w}$$

Ahora que ya se conocen los efectos térmicos, se pueden obtener los momentos mínimos y máximos que resiste cada sección. Como los valores de $f'y(c)$ y $f'c(c)$ varían para cada sección (diferencias muy pequeñas), los momentos mínimo y máximo se calcularán únicamente para la sección 1, a manera de ejemplo. Para las otras secciones de la chimenea, el procedimiento es el mismo y los resultados deberían ser similares.

- Análisis de la capacidad de resistir momento flexionante en ambas caras de la sección 1 (viga sometida a flexión):

Se tienen los siguientes datos:

$$b_w = 12''$$

$$d = 5,81''$$

$$f'c(c) = 3\,722,70 \text{ psi}$$

$$f'y(c) = 50\,262,37 \text{ psi}$$

$$\rho_{\min} = 0,001 \text{ para amabas caras (según ACI 307-08, sección 4.4.2)}$$

$$A_{s_{\min}} = \rho_{\min} b_w d = 0,001(12'')(5,81'') = 0,07 \text{ pulg}^2$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{mín}} &= \phi A_{s_{\text{mín}}} f_y(c) d - \frac{A_{s_{\text{mín}}} f_y(c)}{1,7 f_c(c) b_w} \\
&= 0,9 \cdot 0,07 \cdot 50\,262,37 \cdot 5,81 - \frac{0,07 \cdot 50\,262,37}{1,7 \cdot 3\,722,70 \cdot 12} \\
&= 16\,637,11 \text{ lb pulg/pie} \approx 1\,386,43 \text{ lb pie/pie}
\end{aligned}$$

$$A_{s_{\text{máx}}} = 0,5 \rho_b b_w d$$

En donde, según ACI 318-08, sección B.8.4.2:

$$\begin{aligned}
\rho_b &= \frac{0,85 \beta_1 f_c}{f_y} \frac{87\,000}{87\,000 + f_y} = \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 3\,722,70}{50\,262,37} \frac{87\,000}{87\,000 + 50\,262,37} \\
\rho_b &= 0,034
\end{aligned}$$

$$A_{s_{\text{máx}}} = 0,5 \cdot 0,034 \cdot (12") \cdot (5,81") = 1,19 \text{ pulg}^2$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{máx}} &= \phi A_{s_{\text{máx}}} f_y(c) d - \frac{A_{s_{\text{máx}}} f_y(c)}{1,7 f_c(c) b_w} \\
&= 0,9 \cdot 1,19 \cdot 50\,262,37 \cdot 5,81 - \frac{1,19 \cdot 50\,262,37}{1,7 \cdot 3\,722,70 \cdot 12} \\
&= 270\,361,20 \text{ lb pulg/pie} \approx 22\,530 \text{ lb pie/pie}
\end{aligned}$$

Observar, que al incluir las solicitaciones térmicas, nuevamente el momento mínimo que resiste la sección, es muy superior a los momentos mostrados en la tabla XVII, por lo que nuevamente se procederá a armar con el mínimo, que se estableció anteriormente en el diseño por flexión (ver tabla XXI).

Tabla XXI. **Armado del refuerzo circunferencial por flexión y temperatura**

| Sección | Cuantía de refuerzo circunferencial exterior (ρ') | Cuantía de refuerzo circunferencial interior | Armado del refuerzo exterior | Armado del refuerzo interior |
|---------|--|--|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 2 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 3 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 4 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 5 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 6 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 7 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 8 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 9 | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 10a' | 0,0017 | 0,0011 | núm.3 @ 8" | núm.3 @ 12" |
| 10b' | 0,0034 | 0,0034 | núm.3 @ 4" | núm.3 @ 4" |

Fuente: elaboración propia.

4.9. Diseño del refuerzo en las aberturas

La chimenea posee dos aberturas, una para la puerta de limpieza y otra para la entrada de humos. Ambas están dentro de la sección 1, en donde el armado del refuerzo vertical exterior e interior es núm.6 @ 8 ½ pulgadas y núm.6 @ 17 pulgadas, respectivamente; mientras que el armado del refuerzo circunferencial exterior e interior es núm.3 @ 8 pulgadas y núm.3 @ 12 pulgadas, respectivamente.

4.9.1. Abertura para la puerta de limpieza

Como se mencionó al inicio del presente capítulo, esta abertura posee dimensiones de 3 pies x 3 pies. Ahora se procede a calcular el área de acero interrumpido por la abertura, y el área de acero adicional alrededor de ella.

La cantidad de varillas verticales interrumpidas, es:

$$\frac{(3' \cdot 12)''}{8 \frac{1}{2}''} + \frac{3' \cdot 12''}{17''} = 6,35 \text{ var núm.6}$$

Esto equivale a un área de:

$$6,35 \text{ var núm.6} \cdot \frac{0,44 \text{ pulg}^2}{1 \text{ var no.6}} = 2,79 \text{ pulg}^2$$

Según ACI 307-08 el área de acero adicional a los lados de la abertura, es:

$$A_s \geq 2,79 \text{ pulg}^2 / 2 = 1,40 \text{ pulg}^2$$

Utilizando varilla núm.5, la cantidad de varillas verticales adicionales, es:

$$1,40 \text{ pulg}^2 \cdot \frac{1 \text{ var núm.5}}{0,31 \text{ pulg}^2} = 4,52 \text{ var núm.5}$$

≈ 5 var núm.5 (3 en la cama exterior y 2 en la interior)

Para el refuerzo circunferencial la cantidad de varillas interrumpidas, es:

$$\frac{(3' \cdot 12)''}{8''} + \frac{3' \cdot 12''}{12''} = 7,5 \text{ var núm.3}$$

Esto equivale a un área de:

$$7,5 \text{ var núm.3} \cdot \frac{0,11 \text{ pulg}^2}{1 \text{ var núm.3}} = 0,83 \text{ pulg}^2$$

Además, según ACI 307-08 sección 4.4.7, el área de acero del refuerzo circunferencial adicional no debe ser menor al mayor de:

$$A_s = \text{mitad del acero interrumpido} = 0,83 \text{ pulg}^2 / 2 = 0,42 \text{ pulg}^2$$

$$A_s = \frac{0,06 f'_c t l}{f_y} = \frac{0,06 \cdot 4\,000 \text{ psi} \cdot (8'')(3' \cdot 12'')}{60\,000 \text{ psi}} = 1,15 \text{ pulg}^2$$

Utilizando varilla núm.4, la cantidad de varillas circunferenciales adicionales es:

$$1,15 \text{ pulg}^2 \cdot \frac{1 \text{ var núm.4}}{0,19 \text{ pulg}^2} = 6,05 \text{ var núm.4}$$

≈ 6 var núm.4 (3 en la cama exterior y 3 en la cama interior)

Además por requerimiento del código, se colocarán barras de amarre en todo el perímetro de la abertura. Este refuerzo estará constituido por varillas núm.3 @ 12".

Finalmente, el acero en las esquinas de la abertura, debido a que esta tiene un ancho mayor a 2 pies, es:

$$A_s = 0,10t = 0,10(8'') = 0,80 \text{ pulg}^2$$

Utilizando varilla núm.5, el armado queda así:

$$0,80 \text{ pulg}^2 \cdot \frac{\text{var núm.5}}{0,31 \text{ pulg}^2} = 2,58 \text{ var núm.5} \approx 3 \text{ var núm.5 en cada esquina}$$

En resumen, el refuerzo adicional para la abertura de la puerta de limpieza se presenta en la tabla XXII:

Tabla XXII. **Refuerzo en la abertura para puerta de limpieza**

| Tipo de Refuerzo | | Cantidad de varillas |
|--------------------------------|----------|--|
| Vertical | Exterior | 3 núm.5 (a cada lado de la abertura) |
| | Interior | 2 núm.5 (a cada lado de la abertura) |
| Circunferencial | Exterior | 3 núm.4 (arriba y debajo de la abertura) |
| | Interior | 3 núm.4 (arriba y debajo de la abertura) |
| En cada esquina de la abertura | | 3 núm.5 |
| Barras de amarre | | núm.3 @ 12" (en todo el perímetro) |

Fuente: elaboración propia.

4.9.2. **Abertura para la entrada de humos**

Esta abertura posee dimensiones de 3 pies x 6 pies. Ahora se procede a calcular el área de acero interrumpido por la abertura, y el área de acero adicional alrededor de ella.

Por lo que la cantidad de varillas verticales interrumpidas, es:

$$\frac{(3' * 12")}{8 \frac{1}{2}"} + \frac{3' * 12"}{17"} = 6,35 \text{ var núm.6}$$

Esto equivale a un área de:

$$6,35 \text{ var núm.6} * \frac{0,44 \text{ pulg}^2}{1 \text{ var núm.6}} = 2,79 \text{ pulg}^2$$

Según ACI 307-08 el área de acero adicional a los lados de la abertura, es:

$$As \geq 2,79 \text{ pulg}^2 / 2 = 1,40 \text{ pulg}^2$$

Utilizando varilla núm.5, la cantidad de varillas verticales adicionales, es:

$$1,40 \text{ pulg}^2 * \frac{1 \text{ var núm.5}}{0,31 \text{ pulg}^2} = 4,52 \text{ var núm.5}$$

≈ 5 var núm.5 (3 en la cama exterior y 2 en la interior)

Para el refuerzo circunferencial la cantidad de varillas interrumpidas, es:

$$\frac{(6' * 12)''}{8''} + \frac{6' * 12''}{12''} = 15 \text{ var núm.3}$$

Esto equivale a un área de:

$$15 \text{ var núm.3} * \frac{0,11 \text{ pulg}^2}{1 \text{ var núm.3}} = 1,66 \text{ pulg}^2$$

Además, según ACI 307-08, el área de acero del refuerzo circunferencial adicional no debe ser menor que el mayor de:

$$A_s = \text{mitad del acero interrumpido} = 1,66 \text{ pulg}^2 / 2 = 0,83 \text{ pulg}^2, \text{ o}$$

$$A_s = \frac{0,06 f'_{ct}}{f_y} = \frac{0,06 \cdot 4\,000 \text{ psi} \cdot (8'')(3' * 12)''}{60\,000 \text{ psi}} = 1,15 \text{ pulg}^2$$

Utilizando varilla núm.4, la cantidad de varillas circunferenciales adicionales es:

$$1,15 \text{ pulg}^2 * \frac{1 \text{ var núm.3}}{0,19 \text{ pulg}^2} = 6,05 \text{ var núm.4}$$

≈ 6 var núm.4 (3 en la cama exterior y 3 en la cama interior)

Además, por requerimiento del código se colocarán barras de amarre (especie de estribos abiertos) en todo el perímetro de la abertura. Este refuerzo estará constituido por varillas núm.3 @ 12 pulgadas.

Finalmente, el acero en las esquinas de la abertura, debido a que esta tiene un ancho mayor a 2 pies, es:

$$A_s = 0,10t = 0,10(8") = 0,80 \text{ pulg}^2 \text{ (en cada esquina)}$$

Utilizando varilla núm.5, el armado queda así:

$$0,80 \text{ pulg}^2 * \frac{1 \text{ var núm.5}}{0,31 \text{ pulg}^2} = 2,58 \text{ var núm.5}$$

≈ 3 var núm.5 en cada esquina

En resumen, el refuerzo adicional para la abertura de la puerta de limpieza, se presenta en la tabla XXIII:

Tabla XXIII. **Refuerzo adicional en la abertura para entrada de humos**

| Tipo de Refuerzo | | Cantidad de varillas |
|--------------------------------|----------|--|
| Vertical | Exterior | 3 núm.5 (a cada lado de la abertura) |
| | Interior | 2 núm.5 (a cada lado de la abertura) |
| Circunferencial | Exterior | 3 núm.4 (arriba y debajo de la abertura) |
| | Interior | 3 núm.4 (arriba y debajo de la abertura) |
| En cada esquina de la abertura | | 3 núm.5 |
| Barras de amarre | | núm.3 @ 12" (en todo el perímetro) |

Fuente: elaboración propia.

4.10. Diseño del refuerzo de las ménsulas

Anteriormente se había establecido que la sección lateral de las ménsulas, por unidad de longitud (considerando un ancho de 1 pie), es de 12 pulgadas x 10,50 pulgadas, con un peralte efectivo (d) de 8,65 pulgadas, una luz de cortante (a_v) de 8,25 pulgadas (ver figura 24), y que el cortante último por unidad de longitud (V_u) es 2 129,4 libras (ver sección 4.1 de este trabajo). A continuación se diseñará el refuerzo de las ménsulas, en base al ACI 318-08, sección 11.8:

- Determinando armadura de corte por fricción (A_{vf})

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y} = \frac{2\,129,4\text{ lb}}{0,75 \cdot 60\,000\text{ psi} \cdot 1,4} = 0,03\text{ pulg}^2$$

- Determinando armadura por flexión (A_f)

$$A_f = \frac{\frac{V_u}{\phi} a_v + \frac{N_{uc}}{\phi} h-d}{f_y \cdot 0,85d}$$
$$= \frac{\frac{2\,129,4\text{ lb}}{0,75} \cdot 8,25'' + \frac{0,2 \cdot 2\,129,4\text{ lb}}{0,75} \cdot 10,50'' - 8,65''}{60\,000\text{ psi} \cdot 0,85 \cdot 8,65''}$$
$$= 0,06\text{ pulg}^2$$

- Determinando armadura por esfuerzo axial (A_n)

$$A_n = \frac{N_{uc}}{\phi f_y} = \frac{0,2 \cdot 2\,129,4\text{ lb}}{0,75(60\,000\text{ psi})} = 0,01\text{ pulg}^2$$

- Determinando armadura principal de tensión (A_{sc})

Según ACI 318-08, A_{sc} será igual al mayor de:

$$A_{sc} \geq A_f + A_n = 0,06 \text{ pulg}^2 + 0,01 \text{ pulg}^2 = 0,07 \text{ pulg}^2$$

$$A_{sc} \geq \frac{2}{3} A_{vf} + A_n = \frac{2}{3} 0,03 \text{ pulg}^2 + 0,01 \text{ pulg}^2 = 0,03 \text{ pulg}^2$$

$$A_{sc} = 0,07 \text{ pulg}^2$$

- Determinando armadura de estribos (A_h)

$$A_h \geq 0,5 A_{sc} - A_n = 0,5 0,07 - 0,01 \text{ pulg}^2 = 0,03 \text{ pulg}^2$$

Se puede apreciar que el área de acero requerida por cortante es muy pequeña, por lo tanto, no pareciera no ser necesario colocarán estribos, a menos que la sección de la ménsula no resista el cortante.

- Determinando el cortante que resiste la sección de concreto de la ménsula (V_{cu})

$$V_{cu} = 2\phi \overline{f'_c} b_w d = 2 0,75 \overline{4\,000 \text{ psi}} 12" * 8,65" = 9\,847,33 \text{ lb}$$

Como el cortante que resiste la sección de concreto de la ménsula, es mucho mayor al cortante último ($9\,847,33 \text{ lb} > 2\,129,4 \text{ lb}$), y como el área de acero requerida por cortante, es muy pequeña no es necesario colocar estribos.

- Chequeo del área mínima de acero principal de flexión (A_{sc})

$$A_{sc} \geq 0,04 \frac{f'_c}{f_y} b_w d$$

$$0,07 \text{ pulg}^2 \geq 0,04 \frac{4\,000 \text{ psi}}{60\,000 \text{ psi}} 12'' \cdot 8,65''$$

$$0,07 \text{ pulg}^2 \geq 0,28 \text{ pulg}^2 \rightarrow \text{no cumple}$$

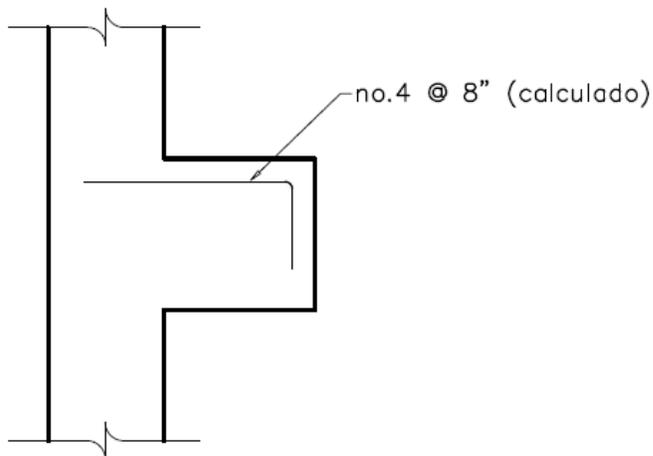
Como no se cumple esta condición, usar el mínimo:

$$A_{sc} = 0,28 \text{ pulg}^2/\text{pie}$$

Utilizando varilla núm. 4 ($a_{vr} = 0,196 \text{ pulg}^2$), el armado es el siguiente:

$$esp = \frac{12''}{A_{sc}/a_{vr}} = \frac{12''}{0,28 \text{ pulg}^2 / 0,196 \text{ pulg}^2} = 8,41'' \approx \text{núm.4 @ 8''}$$

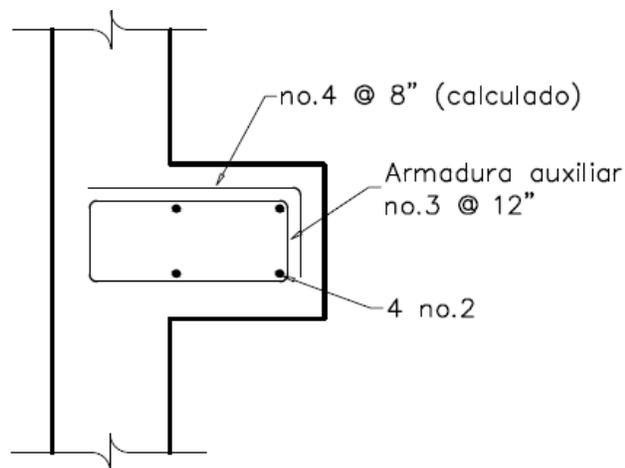
Figura 29. **Armadura preliminar de la ménsula**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Según los chequeos de diseño de la ménsula, la armadura final sería la mostrada en la Figura 29. Sin embargo, no es conveniente armar únicamente con el refuerzo calculado. Por lo que se propone, como solución, para facilitar su construcción, el siguiente armado:

Figura 30. **Armadura final de ménsula**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Este refuerzo propuesto, cumpliría con proveer la armadura auxiliar inclinada que se utiliza en las ménsulas tradicionales y proveería una cuantía mínima de refuerzo en el sentido de los estribos horizontales (recordar que estos, por cálculo, no son necesarios). Además se provee 4 varillas núm.2 para contrarrestar los esfuerzos térmicos que se pudieran generar en las ménsulas.

4.11. Diseño de la cimentación

Previo al diseño del refuerzo de la cimentación, es necesario conocer qué tipo de cimentación se utilizará, y luego, chequear que esta no sufra volteo, y, que la presión bajo la misma, no sobrepase la presión admisible del suelo.

4.11.1. Selección del tipo de cimentación

Como se ha mencionado anteriormente, para chimeneas pequeñas y medianas, el tipo de cimentación más utilizado, es el de losa plana, la cual puede ser de sección circular, cuadrada u octogonal.

Generalmente, sólo aquellas chimeneas que exceden de los 500 pies (152 metros) de altura, se les clasifica como chimeneas altas. Por lo tanto, en el presente ejemplo de diseño, en donde la altura de la chimenea (pequeña) es de 151 pies (46 metros), se utilizará una cimentación del tipo losa plana. La selección del tipo de sección a utilizar, queda a criterio del diseñador. En este caso, por facilidad de cálculo, se utilizará una sección cuadrada.

El diseño de esta cimentación, contempla los procedimientos mínimos para obtener el diseño de la misma. Es únicamente con el fin de ilustrar y recordar el procedimiento a seguir. Se recomienda que este tema sea supervisado por especialistas en el área de estructuras y suelos.

4.11.2. Chequeo contra volteo

Como se ha mencionado anteriormente, el ACI 307, establece que, al momento de diseñar la cimentación de la chimenea, se deberá chequear que esta no se vea sometida a volteo, utilizando un factor de seguridad de 1,50.

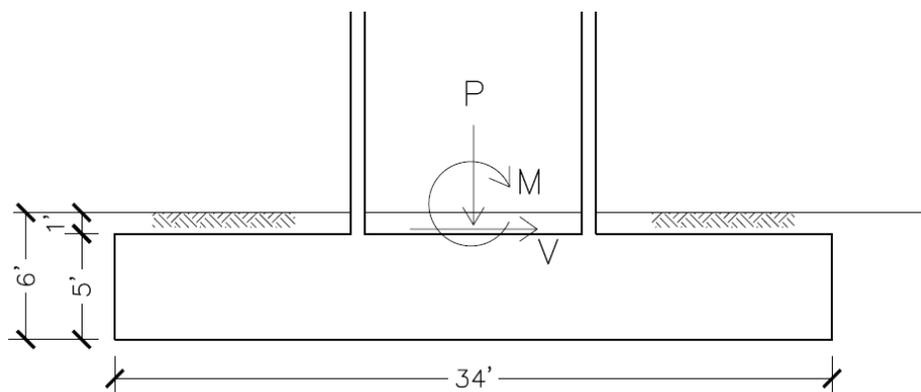
Para el diseño de la cimentación se utilizarán los siguientes datos:

- Desplante de cimentación (Df): 6'
- Momento por sismo (M): 7 914,83 kip pie
- Corte basal (V): 130,41 kip
- Carga muerta por peso propio de la chimenea (W): 517,49 kip
- Peso específico del suelo (γ_s): 0,11 kip/pie³
- Capacidad de carga admisible del suelo (q_{ad}): 3,5 kip/pie²
- Peso específico del concreto (γ_c): 0,15 kip/pie³

Según ACI 307-08, sección 4.1.6.3:

$$\frac{M_r}{M_v} \geq 1,5$$

Figura 31. **Solicitaciones en la cimentación**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Considerando un espesor (t_c) de 5 pies (1,5 metros) y una base cuadrada que mide 34 pies por lado (B). El espesor de 5 pies se propone ya que la profundidad de desplante es 6 pies y el recubrimiento sobre el cemento es de 1 pie. Para el ancho de la zapata, se han hecho algunos intentos con los datos básicos de P, M y V, y se propone después de estos ensayos 34 pies.

$$M_r = \frac{B}{2} B^2 t_c \gamma_c + B^2 D_f - t_c \gamma_s + W_{\text{chimenea}}$$

$$M_r = \frac{34'}{2} 34'^2 5' 0,15 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^3} + 34'^2 6' - 5' 0,11 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^3} + 517,49 \text{ kip}$$

$$= 23\,698,05 \text{ kip pie}$$

$$M_v = M + V(t_c)$$

$$M_v = 7\,914,83 \text{ kip pie} + 130,41 \text{ kip } 5' = 8\,566,88 \text{ kip pie}$$

$$\frac{M_r}{M_v} = \frac{23\,698,05}{8\,566,88} = 3,0 \geq 1,5 \rightarrow \text{ cumple}$$

Esto significa que la cimentación, al estar simultáneamente sometida a cargas por peso propio y sismo, no sufre volteo.

4.11.3. Distribución de presiones bajo la cimentación, por cargas de servicio

Los suelos poseen muy baja resistencia a tensión. Por lo tanto, para asegurarse que se encuentren trabajando a compresión, se debe calcular la distribución de presiones bajo la cimentación debidas a las cargas de servicio (cargas no factoradas) y, también debido a las cargas factoradas. En ambos casos la ecuación a utilizar es:

$$q_{\text{máx}} = \frac{P}{B^2} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right)$$

En este caso, la carga axial (P) es la carga no factorada por peso propio total de la chimenea, el suelo y cimentación; B es el ancho de la cimentación; e es la excentricidad (M_v/P) la cual no debe exceder a B/6. La excentricidad (e), debido a momento por sismo y a carga por peso propio total, no factorados, es:

$$e = \frac{M_v}{P} \leq \frac{B}{6}$$

$$= \frac{M + V(t_c)}{B^2 t_c \gamma_c + B^2 D_f t_c \gamma_s + W} \leq \frac{B}{6}$$

$$= \frac{7\,914,83 \text{ kip pie} + 130,41 \text{ kip } 5'}{34'^2 5' 0,15 \text{ kip/pie}^3 + 34'^2 6' - 5' 0,11 \text{ kip/pie} + 517,49 \text{ kip}} \leq \frac{34'}{6}$$

$$= \frac{8\,566,88 \text{ kip pie}}{1\,511,65 \text{ kip}} \leq \frac{34'}{6}$$

$$= 5,67' \leq 5,67' \rightarrow \text{ cumple}$$

Como sí cumple, las dimensiones asumidas de la cimentación son adecuadas. Por lo que las presiones máximas y mínimas, son:

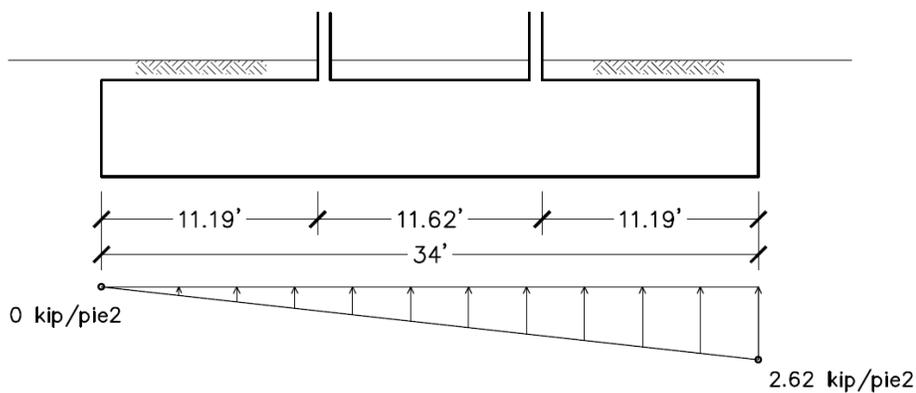
$$q_{\text{máx}} = \frac{P}{B^2} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \leq q_{\text{ad}}$$

$$= \frac{1\,511,65 \text{ kip}}{(34')^2} \left(1 + \frac{6(5,67')}{34'} \right) = 2,62 \text{ kip/pie}^2 \leq 3,5 \text{ kip/pie}^2 \rightarrow \text{ cumple}$$

$$q_{\min} = \frac{P}{B^2} \left(1 - \frac{6e}{B} \right)$$

$$= \frac{1\,511,65 \text{ kip}}{(34')^2} \left(1 - \frac{6(5,67')}{34'} \right) = 0 \text{ kip/pie}^2$$

Figura 32. **Distribución de presiones bajo la cimentación por cargas de servicio**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

En la figura 32, se observa que la parte baja de la cimentación se encuentra totalmente en compresión, lo que garantiza que el suelo no se vea sometido a esfuerzos de tensión. Además se ha verificado que no se sobrepase la capacidad soporte admisible del suelo.

4.11.4. **Distribución de presiones bajo la cimentación, por cargas factoradas (para diseño en concreto por resistencia última)**

A continuación, se repetirá el proceso anterior, con la única diferencia que ahora se utilizarán las cargas factoradas, a manera de conocer las máximas presiones sobre el suelo. Estas son:

Para carga axial factorada (P_u), según ecuación 9-1 del ACI 318-08:

$$U=1,4 D$$

$$P_u=1,4 \cdot 1\,511,65 \text{ kip} = 2\,116,31 \text{ kip}$$

Para momento por sismo, según las ecuaciones del ACI 307-08:

$$M_u=1,0E=1,0M$$

$$M_u=1,0 \cdot 8\,566,88 \text{ kip pie} = 8\,566,88 \text{ kip pie}$$

Por lo tanto:

$$e = \frac{M_u}{P_u} \leq \frac{B}{6}$$

$$e = \frac{8\,566,88 \text{ kip pie}}{2\,116,31 \text{ kip}} \leq \frac{34'}{6}$$

$$e = 4,05' \leq 5,67' \rightarrow \text{cumple}$$

Como sí cumple, las dimensiones asumidas de la cimentación siguen siendo adecuadas. Las presiones máximas y mínimas bajo la cimentación son:

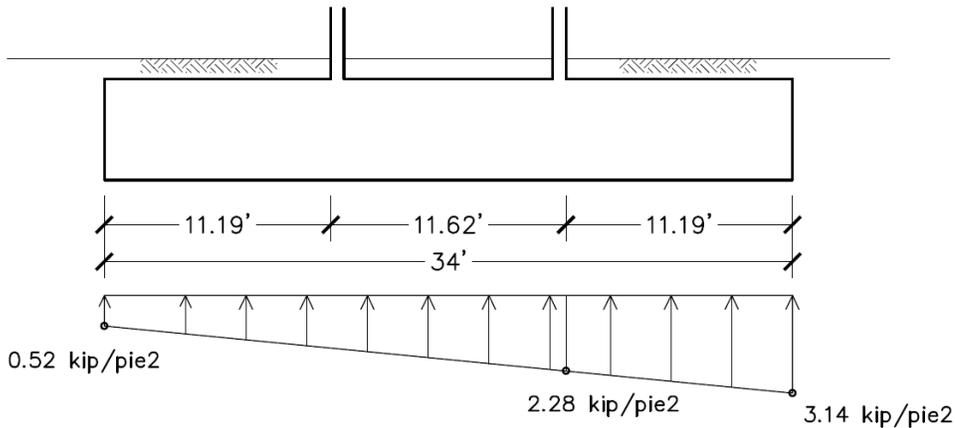
$$q_{\text{máx}} = \frac{P_u}{B^2} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \leq q_{\text{ad}}$$

$$= \frac{2\,116,31 \text{ kip}}{(34')^2} \left(1 + \frac{6(4,05')}{34'} \right) = 3,14 \text{ kip/pie}^2 \leq 3,5 \text{ kip/pie}^2 \rightarrow \text{cumple}$$

$$q_{\text{mín}} = \frac{P}{B^2} \left(1 - \frac{6e}{B} \right)$$

$$= \frac{2\,116,31 \text{ kip}}{(34')^2} \left(1 - \frac{6(4,05')}{34'} \right) = 0,52 \text{ kip/pie}^2$$

Figura 33. **Distribución de presiones bajo la cimentación por cargas factoradas**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Como se ve en la figura 33, que la parte baja de la cimentación se encuentra totalmente en compresión, lo que garantiza que el suelo no se vea sometido a esfuerzos de tensión. Además la presión máxima, es menor a la capacidad soporte admisible del suelo, por lo que las dimensiones asumidas de la cimentación, son las adecuadas.

4.11.5. **Diseño del refuerzo de la cimentación**

Ahora que ya se conoce la distribución de presiones bajo la cimentación, se puede proceder al diseño del refuerzo de la misma. El primer paso es conocer el valor del cortante en la cara exterior del fuste de la chimenea (ver figura 33). En es este punto, la presión (encontrada por relación de semejanza de triángulos) es:

$$q = \frac{3,14 - 0,52 \text{ kip/pie}^2}{34'} \cdot 11,19' + 11,62' + 0,52 \text{ kip/pie}^2 = 2,28 \text{ kip/pie}^2$$

El cortante en la cara exterior del fuste de la chimenea, por pie de longitud, es:

$$V_u = 2,28 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^2} \cdot 11,19' + \frac{1}{2} \cdot 3,14 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^2} - 2,28 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^2} \cdot 11,19' = 30,32 \frac{\text{kip}}{\text{pie}}$$

Asumiendo varilla núm. 6 ($d_v = 3/4$ de pulgada) para el refuerzo a flexión de la cimentación (para tomarlo en cuenta en el cálculo del peralte efectivo)

$$d = t_c - \text{rec} - d_v / 2$$

$$d = (5' \cdot 12) - 3'' - (3/4)'' / 2 \approx 56''$$

El cortante que resiste la sección de concreto por pie de longitud es:

$$V_{cu} = 2 \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$V_{cu} = 2 \cdot 0,75 \sqrt{4\,000 \text{ psi}} \cdot 12'' \cdot (56'' = 6\,375,5 \text{ lb/pie} = 63,75 \text{ kip/pie}$$

$$V_{cu} = 63,75 \text{ kip/pie} > V_u = 30,32 \text{ kip/pie} \rightarrow \text{ cumple}$$

Esto significa que el concreto resiste el cortante. Recordar que el peralte de la zapata no puede reducirse, ya que para el cálculo de las presiones se estableció que el peralte mínimo es de 5 pies.

El segundo paso, es encontrar el momento actuante por pie de longitud, en la cara exterior del fuste de la chimenea. Este es:

$$M_u = 2,28 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^2} \frac{11,19' ^2}{2} + \frac{1}{2} 3,14 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^2} - 2,28 \frac{\text{kip}}{\text{pie}^2} (11,19') \frac{2}{3} (11,19')$$

$$= 178,64 \frac{\text{kip pie}}{\text{pie}}$$

Finalmente, la cuantía de acero por pie de longitud, que se necesita para resistir el momento por flexión, se obtiene mediante:

$$\frac{M_u}{\phi b_w d^2} = \rho f_y - \frac{0,59 \rho^2 f_y^2}{f_c}$$

$$\frac{178,64 \text{ kip pie} * 12\ 000 \text{ lb pulg}}{0,9(12'')(56'')^2} = \rho(60\ 000 \text{ psi}) - \frac{0,59 \rho^2 (60\ 000 \text{ psi})^2}{4\ 000 \text{ psi}}$$

$$\rho = 1,06 * 10^{-3}$$

Pero, según ACI 318-08, sección 10.5.1, la cuantía mínima es:

$$\rho_{\text{mín}} = \frac{200}{f_y} = \frac{200}{60\ 000 \text{ psi}} = 3,33 * 10^{-3}$$

$$\rho_{\text{mín}} > \rho \rightarrow \text{usar } \rho_{\text{mín}}$$

Con esta cuantía se obtiene el área de acero (A_s), por pie de longitud:

$$A_s = \rho_{\text{mín}} b_w d = 3,33 * 10^{-3} (12'')(56'') = 2,24 \text{ pulg}^2$$

Utilizando varilla núm.6 ($a_{vr} = 0,44 \text{ pulg}^2$), el armado en la cama inferior de la zapata es el siguiente:

$$\frac{12''}{2,24 \text{ pulg}^2 / 0,44 \text{ pulg}^2} = 2,36'' \approx \text{núm.6 @ } 2,5'' \uparrow \rightarrow$$

Sin embargo, la distancia entre las varillas, parece ser muy pequeña. Si se utiliza varilla núm.10 ($a_{vr} = 1,27 \text{ pulg}^2$):

$$\frac{12''}{2,24 \text{ pulg}^2 / 1,27 \text{ pulg}^2} = 6,80'' \approx \text{núm.10 @ } 7'' \uparrow \rightarrow$$

Este parece ser un armado más adecuado, por lo que será el armado propuesto para la zapata en la cama inferior.

Ahora únicamente falta calcular el refuerzo de la cama superior de la zapata, el cual cumple la función de resistir los esfuerzos por retracción y temperatura. Según ACI 318, sección 7.12.2.1, la cuantía mínima por retracción y temperatura es 0,0018. Por lo que el área de acero será:

$$A_s = 0,0018 \text{ bd} = 0,0018 \cdot 12''(56'' = 1,21 \text{ pulg}^2$$

Utilizando varilla núm.8 ($a_{vr} = 0,79 \text{ pulg}^2$), el armado en la cama superior de la zapata es el siguiente:

$$\frac{12''}{1,21 \text{ pulg}^2 / 0,79 \text{ pulg}^2} = 7,83'' \approx \text{núm.8 @ } 8'' \uparrow \rightarrow$$

4.12. Detalles de construcción

En la figura 34, se muestra la elevación de la chimenea, destacando la ubicación de las aberturas y de los agujeros de ventilación. Observe que el área total de cada serie de agujeros de ventilación, en pies cuadrados, es aproximadamente igual a dos terceras partes del diámetro interior en la punta del fuste de la chimenea, en pies. De manera que se cumple con el requisito del ACI 318-08, sección 6.6.2. A continuación se muestra dicho cálculo:

- Diámetro interior en la punta del fuste = 4,24' (ver tabla III)
- Diámetro (propuesto) de cada agujero = 10" = 0,83'

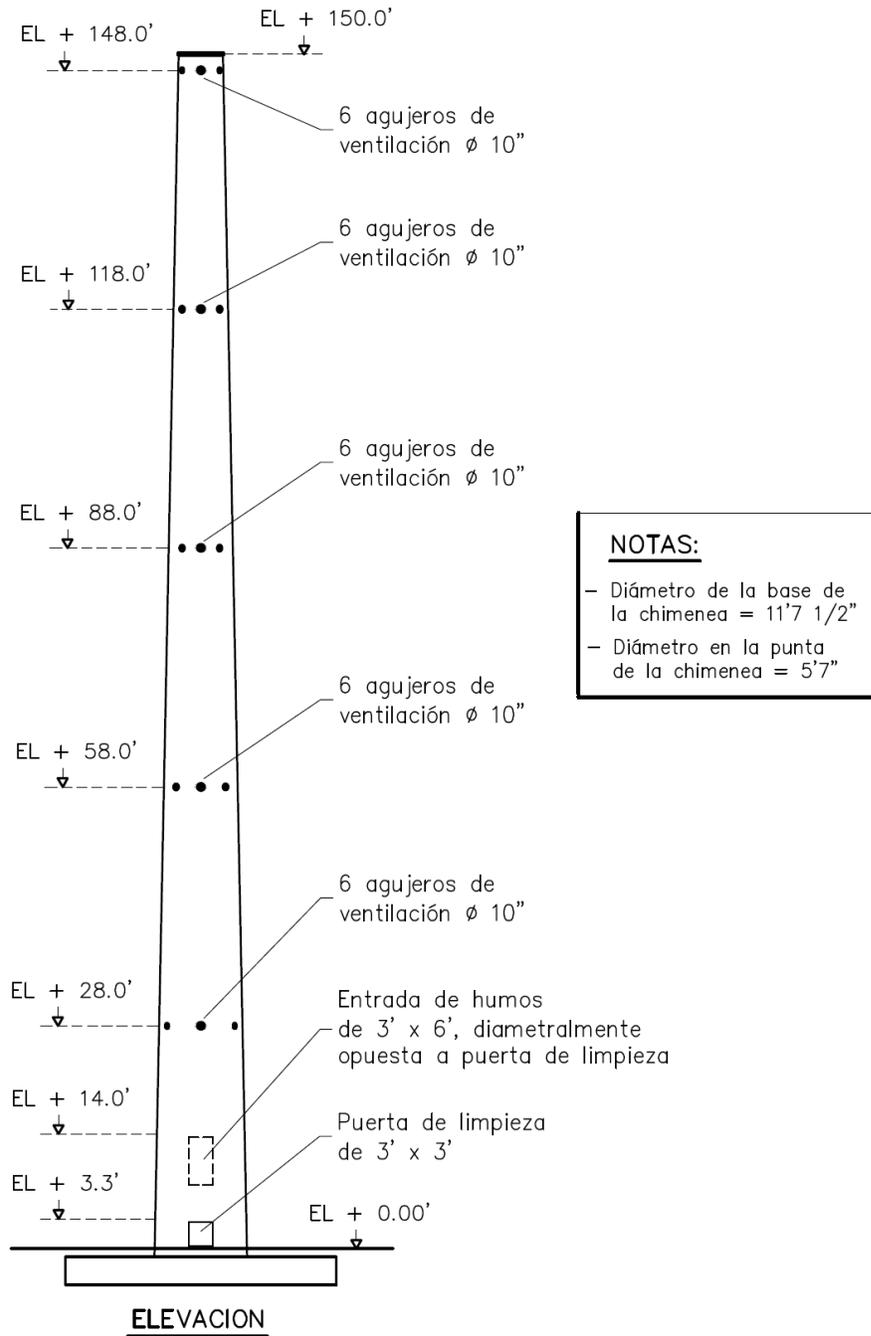
$$\text{Area total de agujeros} = \frac{2}{3} 4,24' = 2,84 \text{ pies}^2$$

$$\text{No.de agujeros} = \frac{2,84 \text{ pies}^2}{\frac{\pi}{4} (0,83')^2} = 5,21 \approx 6 \text{ agujeros } \emptyset 10''$$

En la figura 35, muestra la sección de la chimenea, en la que se destacan los detalles del remate, la ménsula y revestimiento. Además, en la figura 36, se pueden observar los detalles de las juntas de dilación térmica, que deben poseer las ménsulas para no producir esfuerzos en el fuste de la chimenea y sus respectivos agujeros de ventilación para no obstruir el paso del aire.

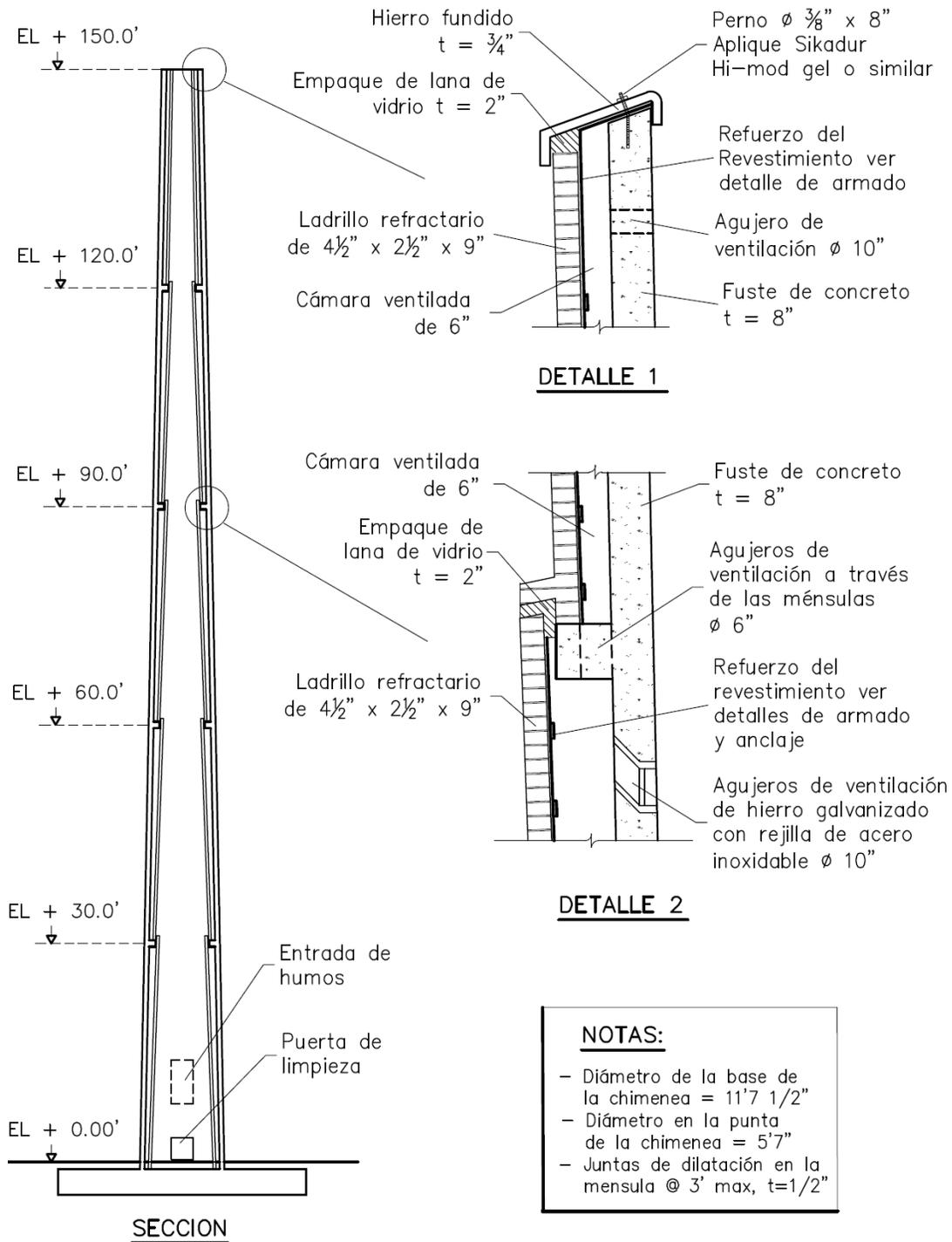
En la figura 36 y 37, se muestra el detalle del refuerzo del revestimiento de ladrillo, el cual se coloca en la cara exterior del mismo, y que está constituido por bandas de hierro dulce circunferenciales y verticales, de 75 milímetros x 6 milímetros y 50 milímetros x 5 milímetros, respectivamente, ambas espaciadas a 3 pies más 4 pulgadas (1 metro).

Figura 34. Elevación de la chimenea



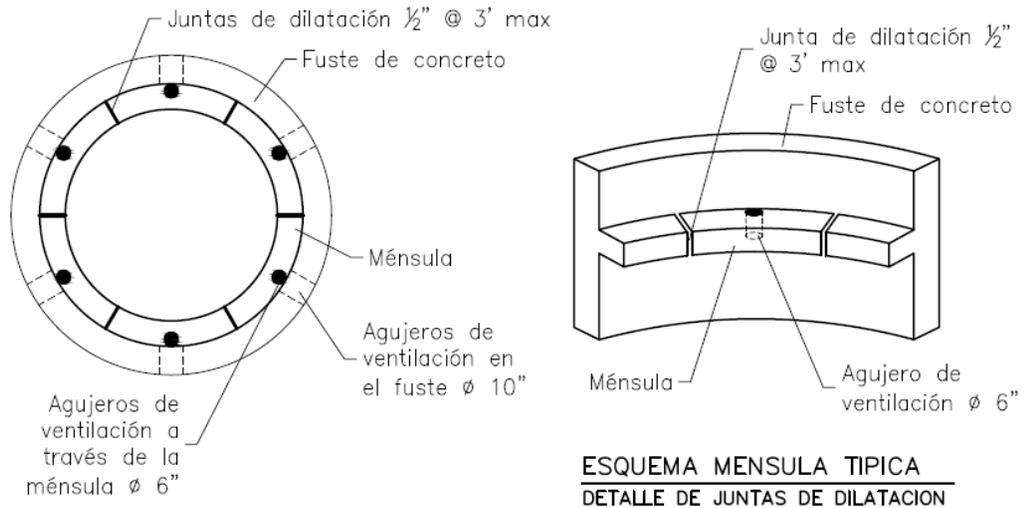
Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 35. Sección de la chimenea

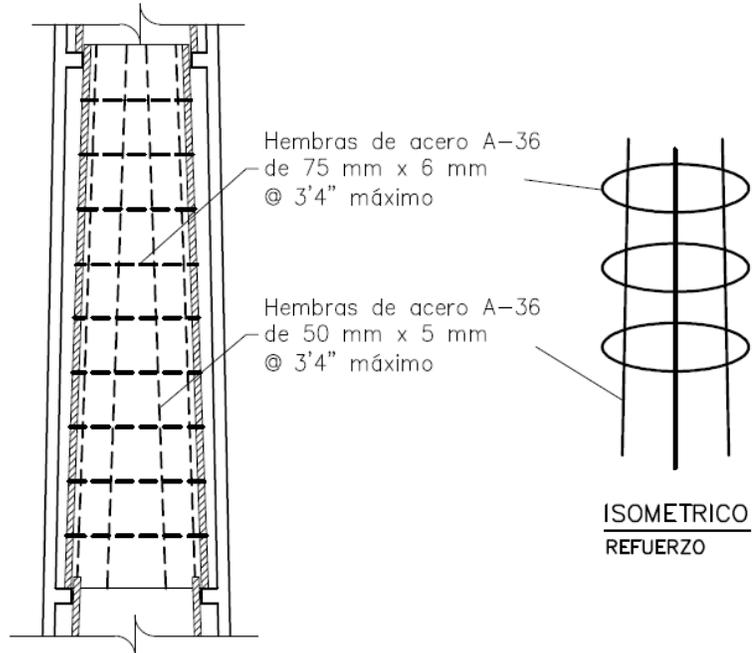


Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 36. Otros detalles



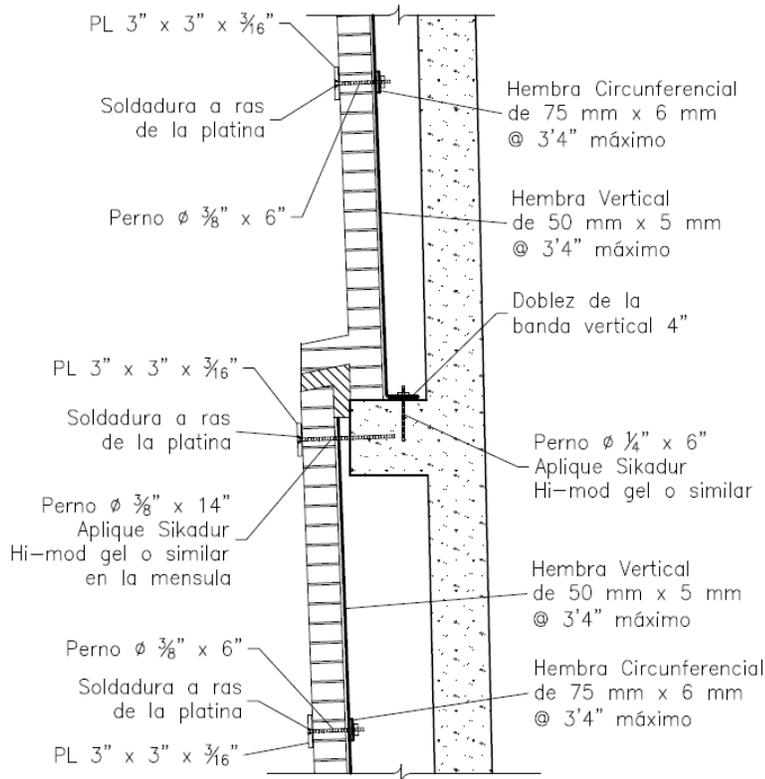
MENSULA PLANTA TIPICA
DETALLE DE JUNTAS DE DILATACION



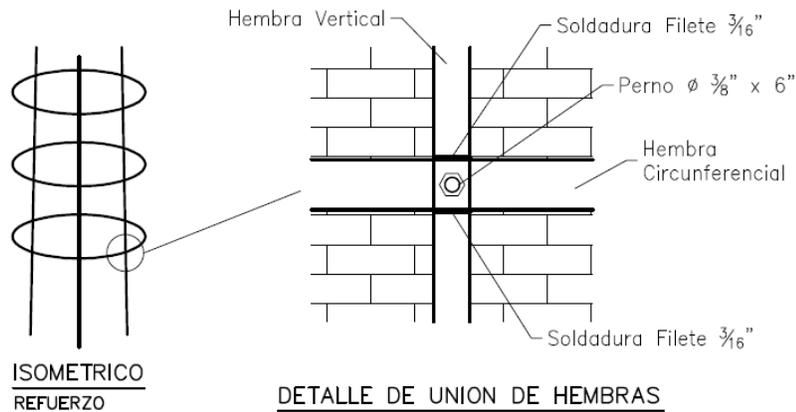
DETALLE DE ARMADO DEL REVESTIMIENTO

Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 37. **Detalles de anclaje del refuerzo del revestimiento**



DETALLE DE ANCLAJE DEL REFUERZO DEL REVESTIMIENTO

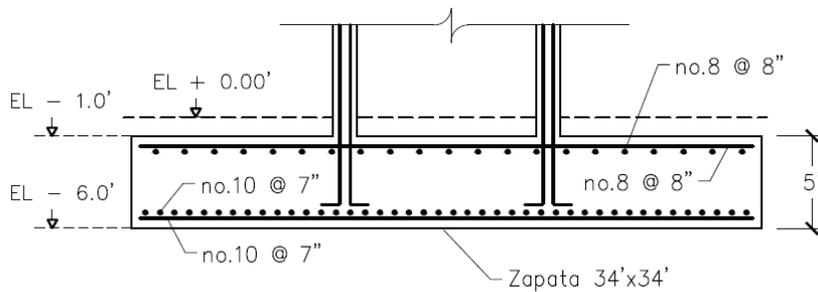


Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

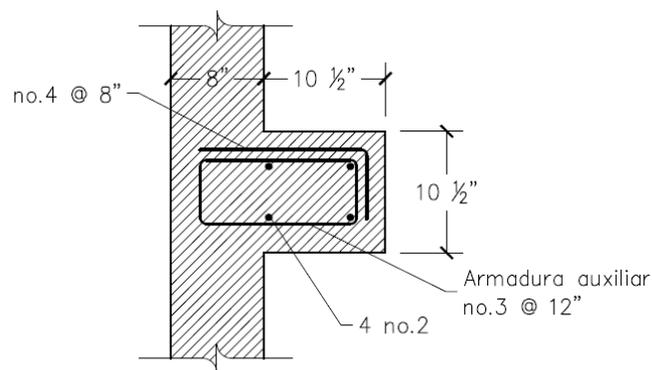
4.13. Detalles de armado

En las figuras 38-42, se muestran los detalles de armado de la chimenea, ménsula y cimentación, producto del cálculo estructural realizado a lo largo del presente capítulo. Finalmente en la figura 42, se aprecian las especificaciones generales a seguir para el armado de los distintos elementos estructurales de la chimenea, cumpliendo con los códigos de diseño utilizados.

Figura 38. **Armado de cimentación y ménsula**



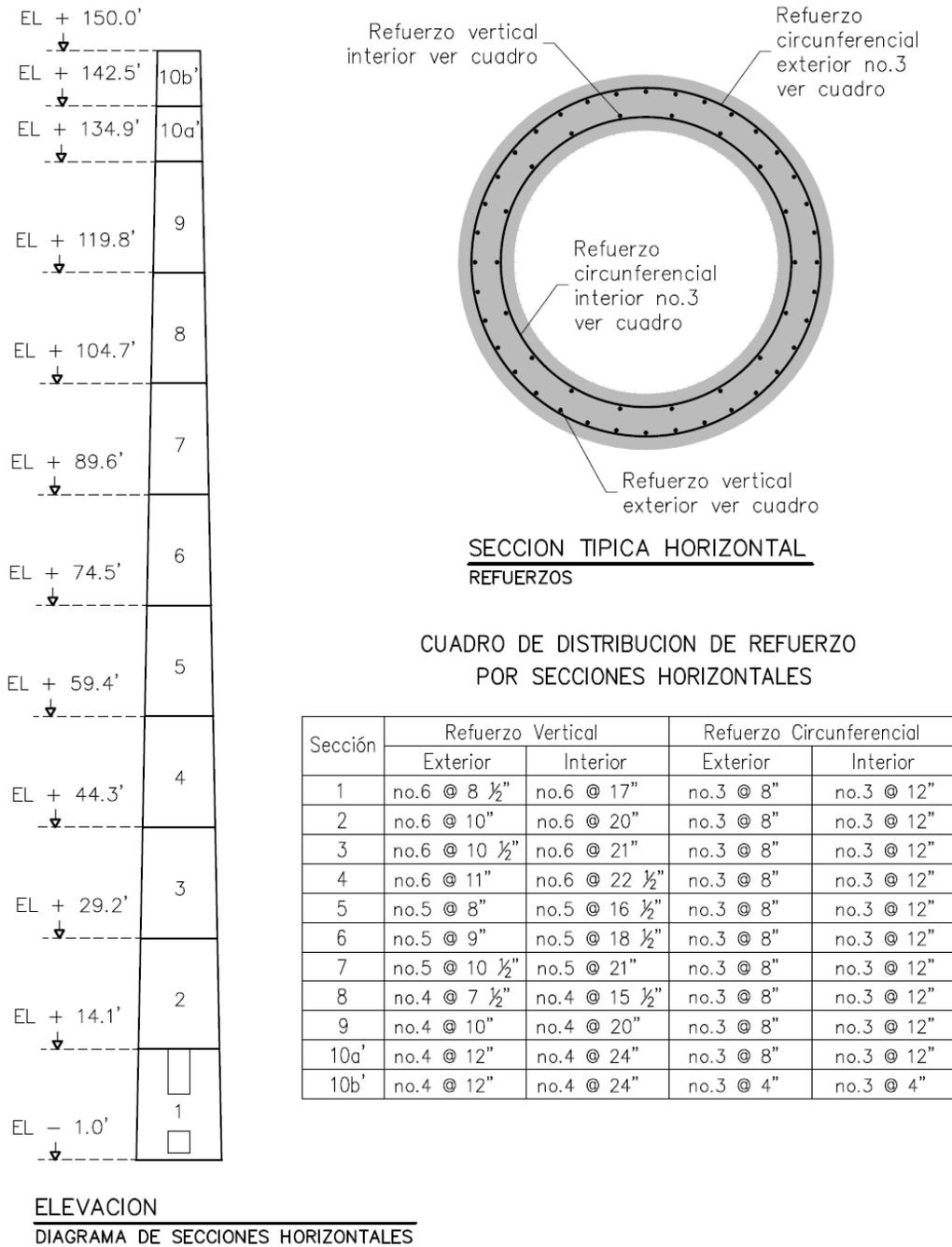
ARMADO DE ZAPATA



ARMADO DE MENSULA

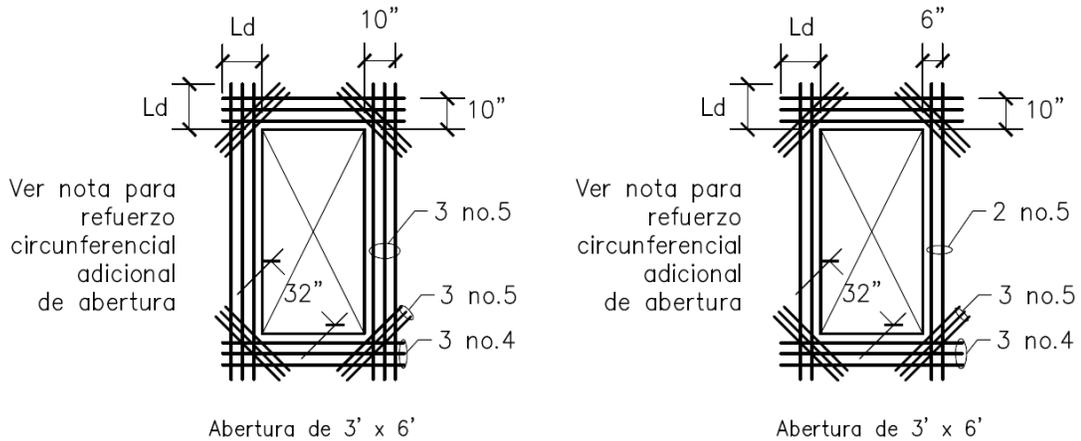
Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 39. Armadura circunferencial y vertical de la chimenea



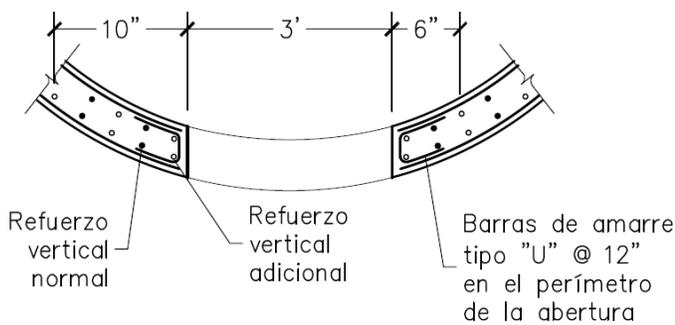
Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 40. Armadura en la entrada de humos

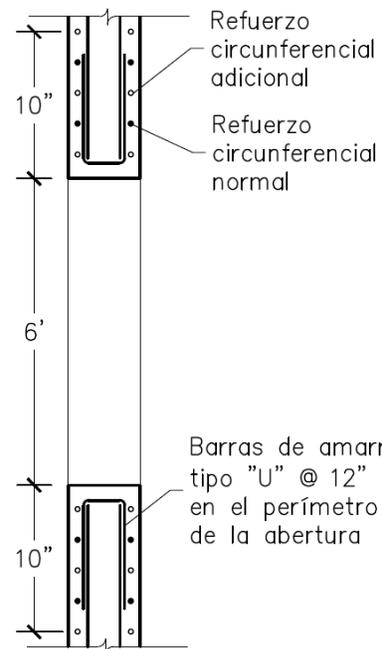


ENTRADA DE HUMOS VISTA FRONTAL
REFUERZO ADICIONAL CAMA EXTERIOR

ENTRADA DE HUMOS VISTA FRONTAL
REFUERZO ADICIONAL CAMA INTERIOR



PLANTA ENTRADA DE HUMOS



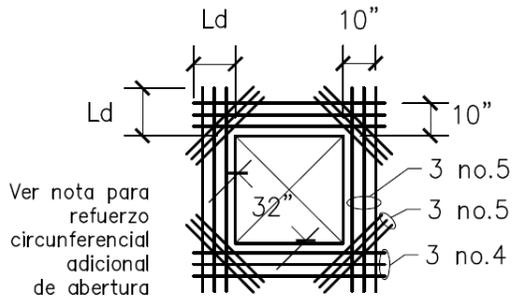
SECCION DE MURO
ENTRADA DE HUMOS

NOTA:

La mitad del refuerzo circunferencial adicional de la abertura se coloca a lo largo de toda la circunferencia, y la otra mitad se pasa una distancia de una longitud de desarrollo (12") de cada rostro vertical del vano.

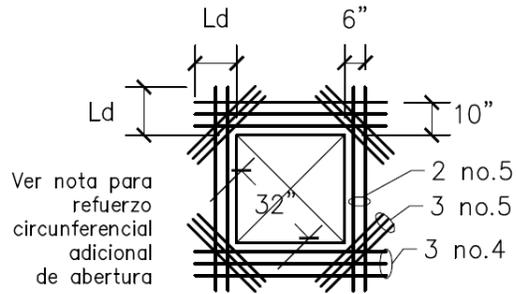
Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 41. Armadura en la puerta de limpieza



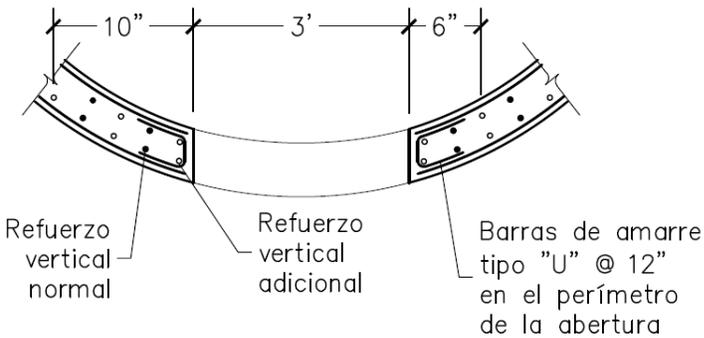
Abertura de 3' x 3'

PUERTA DE LIMPIEZA VISTA FRONTAL
REFUERZO CAMA EXTERIOR

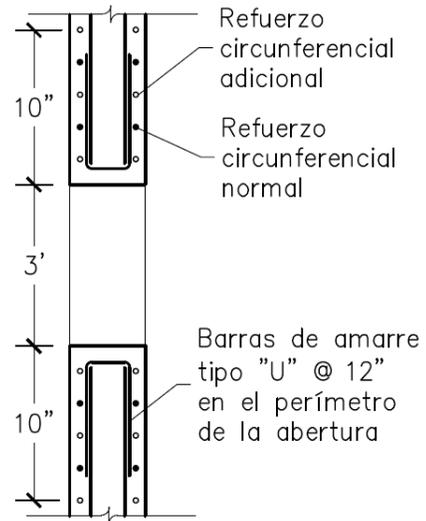


Abertura de 3' x 3'

PUERTA DE LIMPIEZA VISTA FRONTAL
REFUERZO CAMA INTERIOR



PLANTA PUERTA DE LIMPIEZA



SECCION DE MURO
PUERTA DE LIMPIEZA

NOTA:

La mitad del refuerzo circunferencial adicional de la abertura se coloca a lo largo de toda la circunferencia, y la otra mitad se pasa una distancia de una longitud de desarrollo (12") de cada rostro vertical del vano.

Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Figura 42. Especificaciones generales

| ESPECIFICACIONES GENERALES | | |
|----------------------------|--|--------------------------------------|
| 1. CONCRETO | | 4,000 psi |
| 2. ACERO DE REFUERZO | | 60,000 psi |
| REFUERZO DEL REVESTIMIENTO | | A-36 (fy = 36,000 psi) |
| 3. MAMPOSTERIA | Ladrillo refractario 9" x 4.5" x 2.5" | |
| | Densidad 125 lb/pie ³ | |
| | Conductividad térmica 11.2 Btu plg/h pie ² °F | |
| 4. LONGITUD DE ANCLAJES | | |
| BARRA | LONGITUD DE DESARROLLO | GANCHOS 90° |
| # 3 | 12" | 4.5" |
| # 4 | 12" | 6" |
| # 5 | 16" | 7.5" |
| # 6 | 20" | 9" |
| 5. RECUBRIMIENTOS | | |
| FUSTE | 2" | |
| MENSULA | 1.5" | |
| ZAPATA | 3" | |
| 6. PERNOS | | ASTM A 325 |
| 7. SOLDADURA | | Electrodo 70xx (70,000 psi) |
| 8. VALOR SOPORTE SUELO | | Asumido 3.5 kip/pie ² |
| 9. CODIGOS DE DISEÑO | | ACI 307-08 ACI 318-08 UBC 1997 |

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Para el diseño de una chimenea industrial de concreto reforzado, se deben considerar tres elementos estructurales básicos: el fuste, cimentación y las ménsulas de apoyo del revestimiento. El fuste deberá cumplir con los requerimientos del código ACI 307; la cimentación y ménsulas de apoyo deberán cumplir con los requerimientos del código ACI 307 y ACI 318.
2. En el diseño estructural de toda chimenea industrial, las cargas a considerar son; la carga de viento, sismo, temperatura y peso propio. Sin embargo, en el territorio nacional, y para chimeneas de una altura no mayor a 60 metros, se puede despreciar la acción del viento, en lo que se refiere a flexión vertical, puesto que la acción de sismo es más crítica.
3. Para toda chimenea industrial que no sobrepase los 60 metros de altura, la acción del viento pareciera ser despreciable, en lo que se refiere a flexión circunferencial. Sin embargo, es recomendable, hacer los respectivos chequeos.
4. Generalmente, en zona sísmica, la combinación de carga crítica, para el diseño del refuerzo vertical de una chimenea industrial, es: $0,9 D + 1,0 E + 1,2 T$.

5. El método propuesto por el ACI 307-08, para el diseño del refuerzo vertical de una chimenea industrial de concreto reforzado, es muy complejo e iterativo. Mientras que el método propuesto por el Dr. Rumman Wadi, es más práctico y simple, además ofrece resultados muy similares al del código.

6. Se realizó el diseño estructural del modelo de una chimenea industrial en concreto reforzado, propuesto por el autor de este trabajo, tomando en cuenta los requerimientos del código ACI 307-08 y ACI 318-08, para cada una de las partes que la componen. Asimismo los detalles de armado y construcción de la chimenea, en base a los resultados obtenidos del cálculo.

RECOMENDACIONES

1. Para evitar tensiones elevadas en el fuste de la chimenea, la relación entre la altura y la base de la chimenea, se deberá encontrar en el rango de 12 a 13.
2. Al realizar el análisis sísmico de una chimenea de menos de 60 metros de altura, se recomienda utilizar el método estático equivalente. Si se quisiera efectuar el análisis sísmico de una chimenea de más de 60 metros de altura, se puede utilizar dicho método a manera de prediseño, o bien, utilizar el método de análisis espectral, o el método de análisis en el tiempo.
3. Es muy importante utilizar y contar con programas de cálculo matemático para el diseño del refuerzo vertical de la chimenea, ya que el procedimiento de cálculo que brinda el ACI 307-08, requiere de muchas iteraciones.
4. Al hacer las combinaciones de cargas que establece el ACI 307-08, para el diseño del refuerzo vertical de toda chimenea industrial, es muy probable, aunque no definitivo, que la combinación de cargas crítica sea: $0,9 D + 1,0 E + 1,2 T$, por lo que se debiera evaluar las otras combinaciones de cargas.

5. Como una alternativa al método propuesto por el ACI 307-08, en lo que se refiere al cálculo del refuerzo vertical, el método gráfico del Dr. Rumman Wadi es una buena opción, ya que es más rápido y menos complejo, con resultados muy similares al del código ACI 307-08.

6. Muy importante indagar sobre el tema del cálculo de la altura de la chimenea, ya que la altura que se establezca, deberá proveer bajos niveles de contaminación y seguridad en el área en que esta se va a construir. En este trabajo la altura se ha orientado más al cálculo y diseño estructural, que a la función de descargar los humos con los requerimientos para evitar la contaminación del sector a servir.

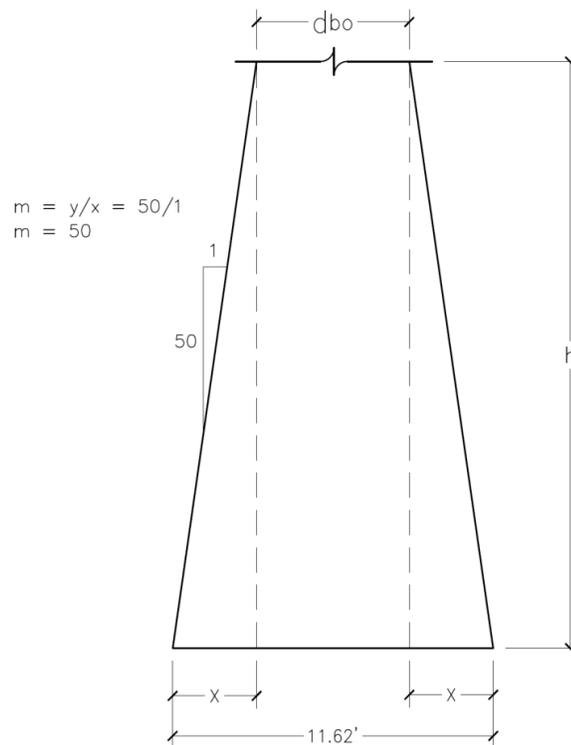
BIBLIOGRAFÍA

1. American Concrete Institute. *Code requirements for reinforced concrete chimneys (ACI 307-08) and commentary*. Estados Unidos: ACI, 2008. 30 p.
2. _____. *Requisitos de reglamento para el concreto estructural y comentario (ACI 318S-08)*. México: ACI, 2008. 520 p.
3. _____. *Specification for the design and construction of reinforced concrete chimneys (ACI 307-79)*. Estados Unidos: ACI, 2008. 63 p.
4. American Society of Civil Engineers. *Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE 7-02)*. Estados Unidos: ASCE, 2002. 369 p. ISBN: 0-7844-0624-3.
5. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala*. Serie de manual No. 2 (NSE 2-10). Guatemala: AGIES, 2010. 63 p.
6. FINTEL, Mark. *Handbook of concrete engineering*. 2a ed. Nueva York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985. 875 p. ISBN: 0-442-22623-3.
7. HARMSSEN, Teodoro E. *Diseño de estructuras de concreto armado*. 3a ed. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2002. 681 p.

8. HEMSLEY, J.A. *Design applications of raft foundations*. Londres: Thomas Telford, 2000. 607 p. ISBN: 0-7277-2765-6
9. International Code Council. *Uniform building code UBC Volume 2: structural engineering design provisions*. Estados Unidos: 1997. 492 p.
10. M. PINFOLD, Geoffrey. *Reinforced concrete chimneys and towers*. Letchworth: The Garden City Press Limited, 1975. 233 p. ISBN: 0-7210-0993-X.
11. MANOHAR, S.N. *Tall chimneys design and construction*. New Dehli: McGraw-Hill, 1985. 259 p.

APÉNDICES

Figura 43. **Determinación del diámetro del fuste a una altura h**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

Si $y = h$, de la figura se puede deducir que:

$$x = \frac{y}{m} = \frac{h}{m} = \frac{h}{50}$$

Por lo que el diámetro de la chimenea a cualquier altura h es:

$$d_{bo} \text{ (a una altura } h) = 11,62' - 2x = 11,62' - 2(h/50)$$

Tabla XXIV. **Método del ACI 307-08 vs Método del Dr. Rumman Wadi**

| Sección | P _u (lb) | t (") | r (") | β (°) | ρ _t | ØM _n (kip-pie) | |
|---------|---------------------|-------|-------|-------|----------------|---------------------------|-----------------|
| | | | | | | ACI 307-08 | Dr. Rumman Wadi |
| 1 | 465 742,25 | 8 | 63,88 | 16 | 0,0096 | 8 633,23 | 8 478,50 |
| 2 | 403 065,51 | 8 | 60,26 | 0 | 0,0083 | 7 329,68 | 7 321,76 |
| 3 | 344 176,31 | 8 | 56,63 | 0 | 0,0079 | 6 121,26 | 6 105,20 |
| 4 | 286 135,97 | 8 | 53,01 | 0 | 0,0074 | 4 989,04 | 4 965,87 |
| 5 | 234 821,81 | 8 | 49,38 | 0 | 0,0070 | 4 051,96 | 4 026,10 |
| 6 | 184 749,42 | 8 | 45,76 | 0 | 0,0063 | 3 112,41 | 3 083,04 |
| 7 | 141 010,29 | 8 | 42,14 | 0 | 0,0055 | 2 293,48 | 2 264,53 |
| 8 | 98 899,35 | 8 | 38,51 | 0 | 0,0046 | 1 585,49 | 1 560,90 |
| 9 | 62 735,27 | 8 | 34,89 | 0 | 0,0036 | 1 005,49 | 986,44 |
| 10 | 28 589,03 | 8 | 31,26 | 0 | 0,0025 | 550,43 | 528,50 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXIV, se muestran los resultados obtenidos, del cálculo de los momentos resistentes (ØM_n) para cada sección de la chimenea, cuando esta se encuentra sometida a flexo-compresión, con el método del código ACI 307-08, (ver sección 4.4 de este trabajo de investigación), y los obtenidos con el método del Dr. Rumman Wadi, que se mencionó al final del capítulo 3, los cuales, como se recordará, se calculan a partir de las gráficas mostradas en las figuras 19, 20, 21 y 22, o por la siguiente ecuación:

$$\frac{M_n}{P_u r} = 1 + 6 - 2 \frac{P_u}{r t f'c} \left(\frac{\rho_t f_y / f'c}{\frac{P_u}{r t f'c}} \right) \left(1 - \frac{\beta^{1,15}}{200} \right)$$

Observar que los momentos resistentes (ØM_n) de cada una de las secciones de la chimenea, calculados con cada método y a partir de la misma cuantía de acero, son muy similares entre sí.

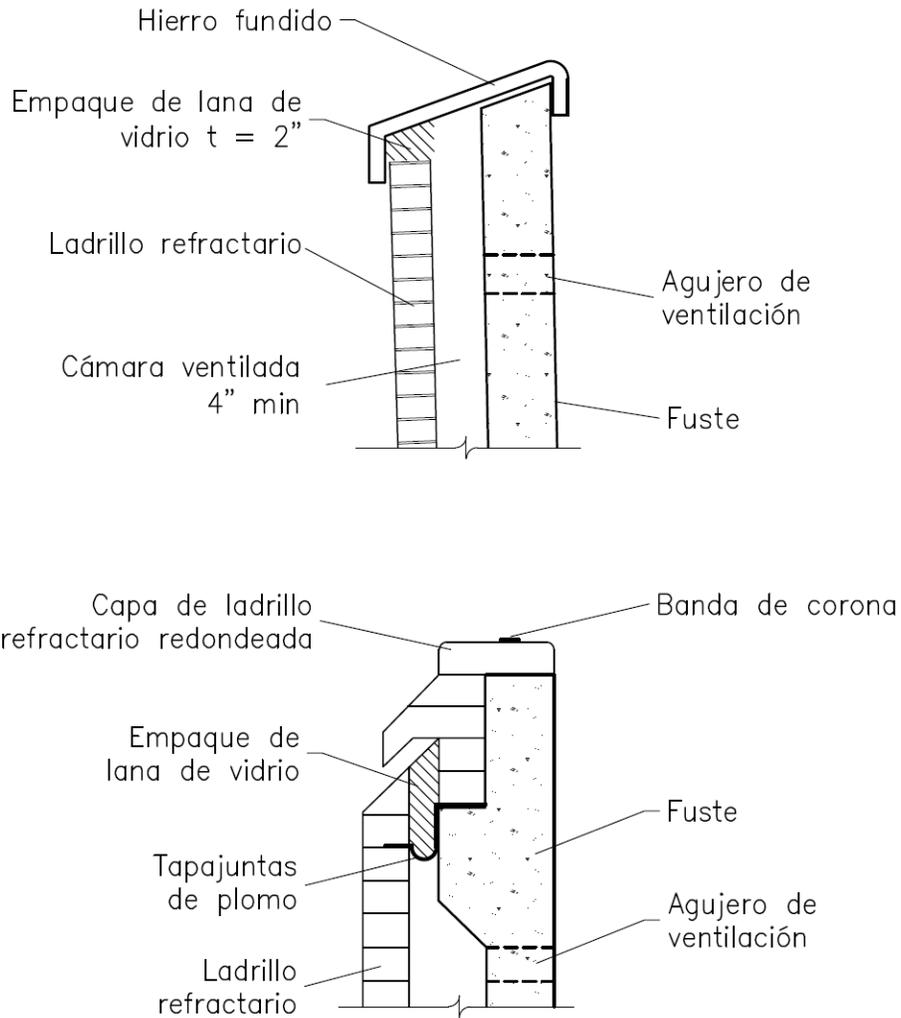
Tabla XXV. **Comparación entre las distintas combinaciones de carga del código ACI 307-08**

| Sección | ρ_t | ϕM_n (kip-pie) | | |
|---------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| | | 0,9 D + 1,0 E + 1,2 T | 1,2 D + 1,0 E + 1,2 T | 1,4 D |
| 1 | 0,0096 | 7 967,85 | 8 427,22 | 8 722,47 |
| 2 | 0,0083 | 6 779,61 | 7 249,34 | 7 570,21 |
| 3 | 0,0079 | 5 655,82 | 6 037,41 | 6 288,79 |
| 4 | 0,0074 | 4 608,28 | 4 909,07 | 5 107,53 |
| 5 | 0,0070 | 3 563,70 | 3 975,29 | 4 129,08 |
| 6 | 0,0063 | 2 870,21 | 3 042,30 | 3 156,14 |
| 7 | 0,0055 | 2 109,02 | 2 231,66 | 2 312,92 |
| 8 | 0,0046 | 1 455,33 | 1 535,83 | 1 589,50 |
| 9 | 0,0036 | 918,38 | 964,90 | 995,85 |
| 10 | 0,0025 | 499,12 | 518,97 | 532,21 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXV se muestran los momentos resistentes (ϕM_n) de cada sección de la chimenea, calculados a partir de una misma cuantía de refuerzo, y utilizando distintas combinaciones de cargas. Observar que los momentos críticos, se obtienen con la combinación de cargas: 0,9 D + 1,0 E + 1,2 T, ya que ésta combinación de cargas, establece los menores valores de momento resistente con la misma cuantía de acero.

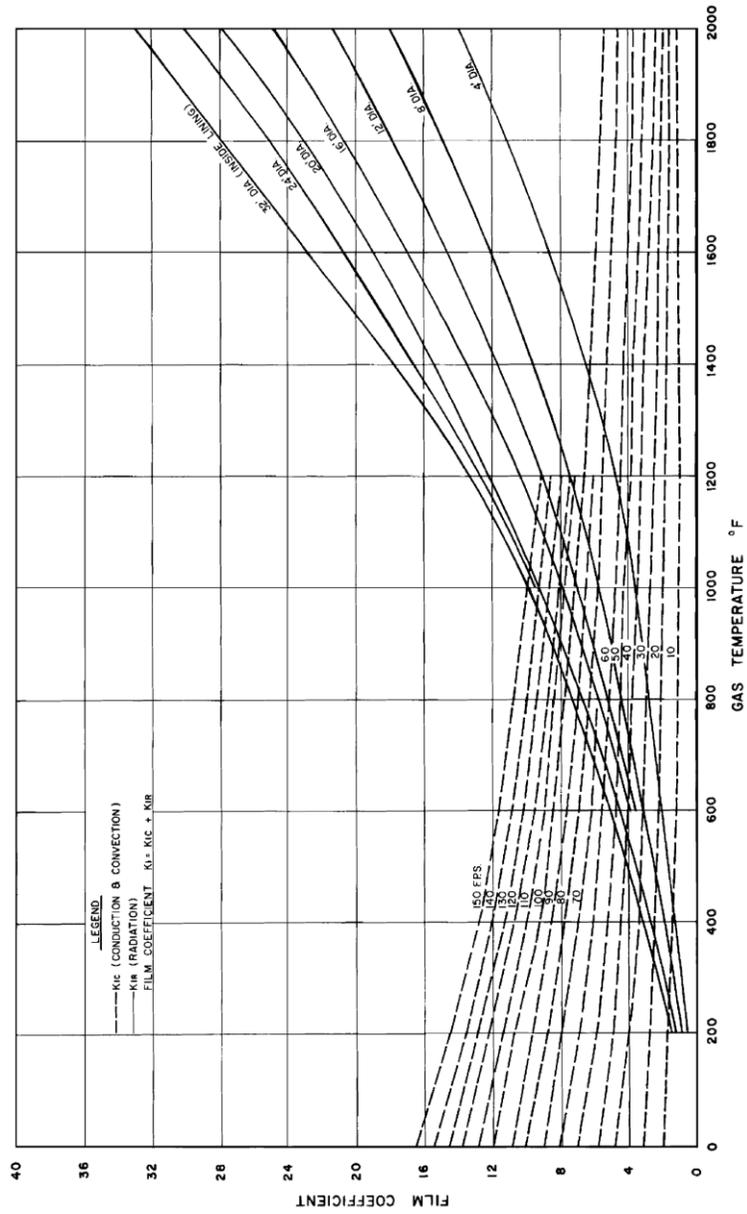
Figura 44. **Tipos de Remates de un Chimenea Industrial**



Fuente: elaboración propia, con programa de dibujo asistido por computadora (CAD).

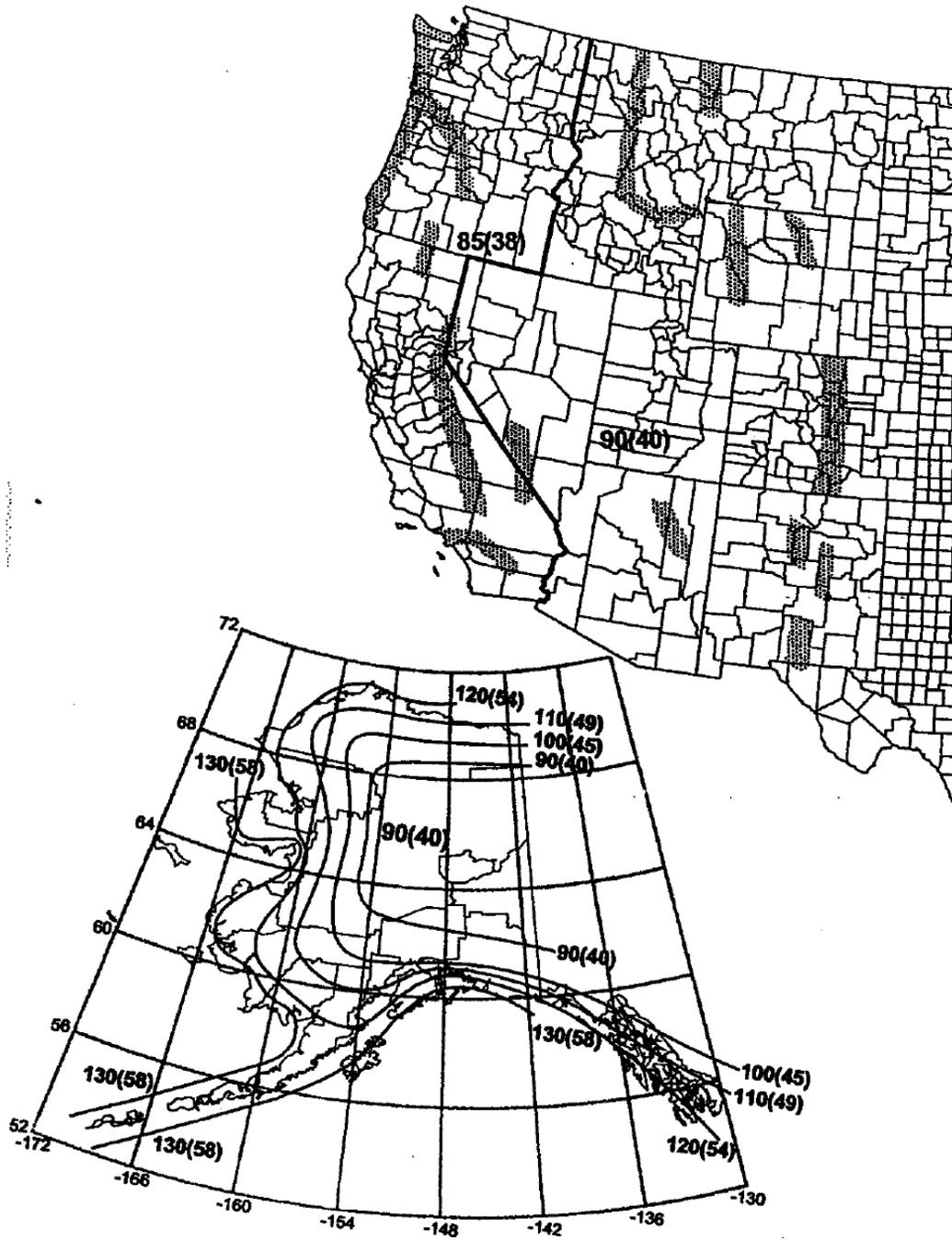
ANEXOS

Figura 45. Gráfica para determinar el valor de K_i



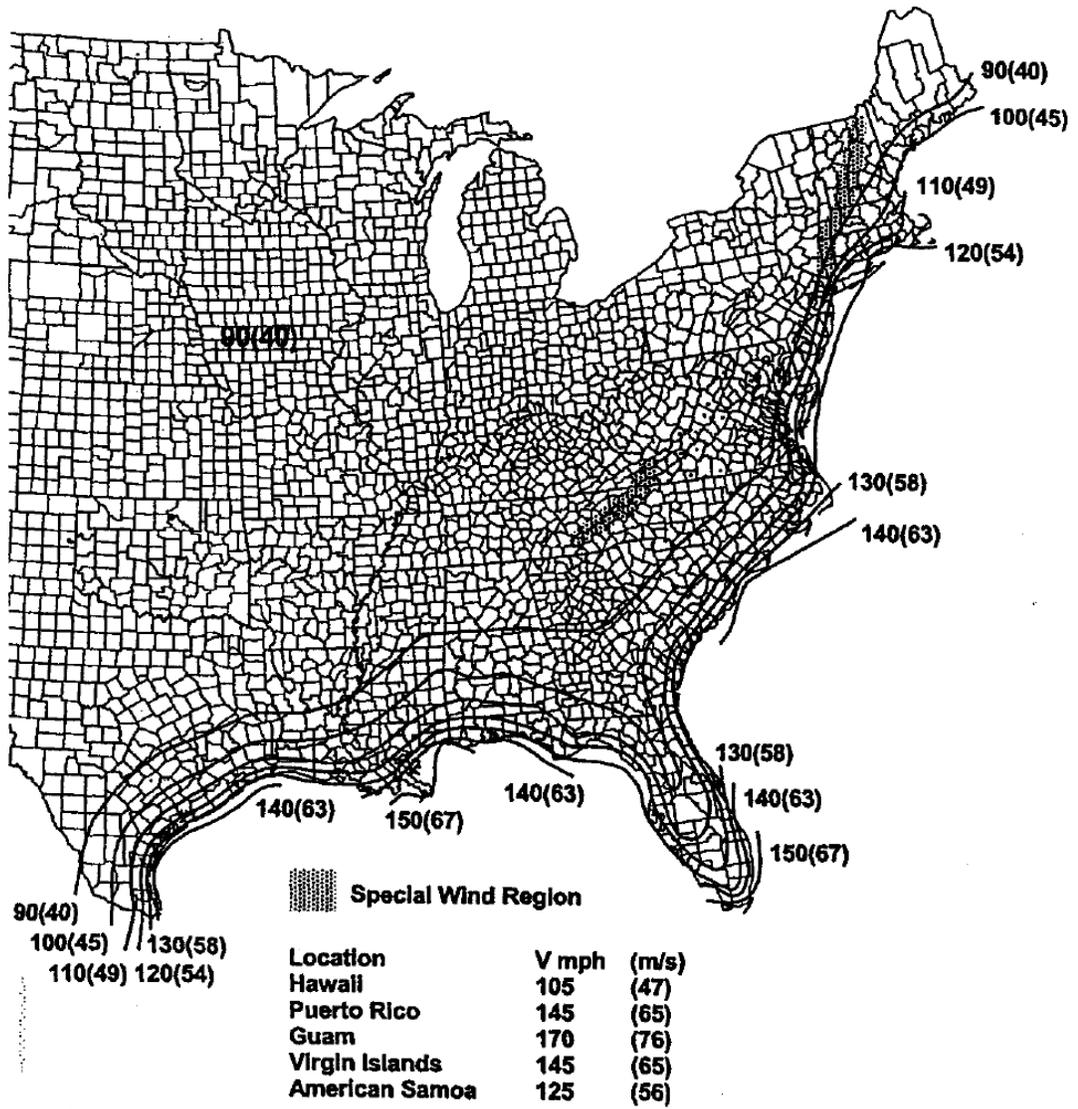
Fuente: Código ACI 307-08. p. 23.

Figura 46. Velocidades básicas del viento según ASCE-02 en mph (m/s)



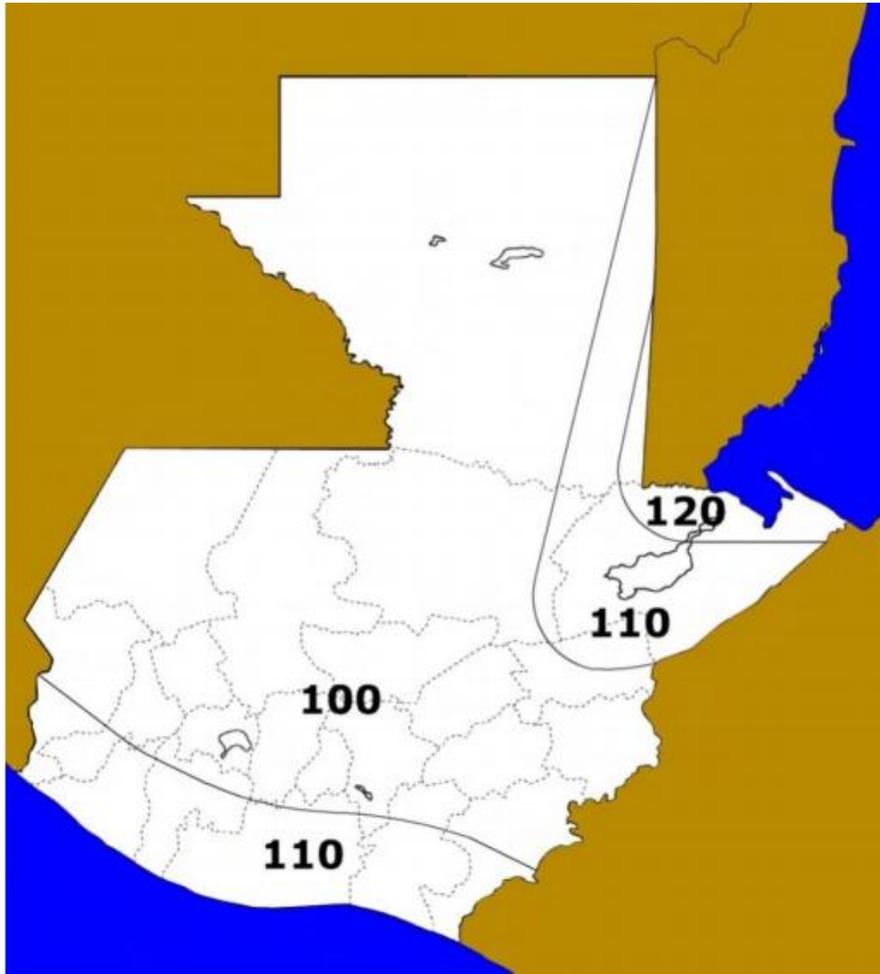
Fuente: Código ASCE 7-02. p. 36.

Continuación de la figura 46.



Fuente: Código ASCE 7-02. p. 37.

Figura 47. Velocidades básicas del viento para Guatemala en Km/h



Fuente: AGIES NSE 2-10. p. 30.

