

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



*Diseño Sísmico de Chimeneas en Voladizo de
Sección Circular Empotradas en la Base*

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

VICTOR IVAN FERNANDEZ - DAVILA GONZALES

Promoción 1987 " 1

LIMA - PERU - 1989

SUMARIO

La presente tesis comprende el estudio de una estructura continua tipo chimenea, cuando se encuentra sometida a la acción de un evento sísmico.

Tomando como base teorías desarrolladas por la dinámica estructural, se propone una fórmula para evaluar el período fundamental de vibración y un método estático simplificado para calcular las respuestas sísmicas actuantes en cualquier chimenea.

INTRODUCCION

La necesidad de poder disponer de ciertos parámetros para diseñar estructuras continuas, como es el caso particular de CHIMENEAS, nos ha motivado a realizar un estudio completo de ella.

Para el desarrollo de la investigación, se confeccionó un Programa de Cómputo en lenguaje Basic, con el objeto de poder analizar en corto tiempo la gran cantidad de modelos que fueron considerados.

Los resultados obtenidos, luego de ser interpretados, nos sirvieron para plantear una METODOLOGIA SIMPLE DE ANALISIS, la que tiene por finalidad, ahorrarle al proyectista el tiempo que invertiria en realizar un análisis completo de su estructura, para obtener las fuerzas cortantes y los momentos flectores que necesita en el diseño.

La inquietud que tuvimos por el tema, nos impulsó a preparar dos trabajos que fueron presentados a la Comisión Coordinadora del VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, resultando, ambos, elegidos para ser expuestos en dicho evento. Fue para nosotros una satisfacción, que el esfuerzo realizado, se retribuyera con la acogida demostrada por los Ingenieros y estudiantes que asistieron (1,2).

Esta Tesis, pretende básicamente, aclarar las nociones e ideas que fueron empleadas en dichos trabajos y unirlos en solo uno, tal como inicialmente fue concebido. Su desarrollo se encuentra estructurado en seis capítulos, conteniendo cada uno de ellos la siguiente información:

El Primer Capítulo está referido al **Análisis Dinámico de Chimeneas**. Aquí se considera que la chimenea se comporta en el rango elástico y se encuentra perfectamente empotrada en la base (3).

Además, ha sido modelada como una viga recta no uniforme, cuya altura es mucho mayor comparada con las dimensiones de su sección transversal.

Esta sección transversal es circular y hueca, con dimensiones (radio y espesor) variables linealmente con la altura.

Se ha tenido en cuenta, en el interior de la chimenea, un recubrimiento refractario que protege al concreto ante el ataque de vapores y gases que pudiera tener el humo que desaloja.

Hemos considerado como recubrimiento, un muro de albañilería de ladrillo refractario de espesor constante y que interviene en el análisis, solamente aumentando la masa de la estructura sin alterar su rigidez.

Para obtener las características modales de la estructura (que son tan importantes para el cálculo de la respuesta debido al sismo), se cuenta con tres métodos de análisis:

- El Método de los Elementos Continuos,
- El Método de Myklestad y
- El Método Matricial.

Siendo el primero un Método Exacto y los dos últimos aproximados, por ser su proceso netamente iterativo.

Se detalla los alcances de cada uno de ellos y se comparan los resultados que otorgan para dos casos particulares de chimeneas (una de sección transversal uniforme y otra de sección transversal variable), eligiéndose de esta forma el que sea más favorable.

Luego, empleando el método elegido y los mismos casos particulares, se determina el número óptimo de masas con el que se debe discretizar a la estructura.

De igual manera y bajo el mismo criterio anterior, se determina el número de formas de modos significativos que debemos de combinar para calcular las respuestas actuantes en la estructura, por efecto de un evento sísmico.

El Segundo Capítulo, está referido a la Determinación Simplificada de los Periodos de Vibración aquí se analiza una gran cantidad de chimeneas adimensionales, obteniéndose de cada una sus periodos de vibración en función de sus

características físicas y geométricas.

A partir de estos periodos se determinó una fórmula para calcular el Periodo Fundamental de Vibración de la estructura, encontrándose además, dos expresiones para obtener los periodos correspondientes al Segundo y Tercer modo de vibración.

Se demuestra que el error que se comete al evaluar el periodo fundamental de vibración sin considerar la deformación por corte, va disminuyendo a medida que la relación H/D (altura total de la chimenea entre el diámetro medio de la base) aumente.

Finalmente, se comparan los periodos fundamentales de una serie de chimeneas, empleando la fórmula propuesta, el método dinámico elegido y otras formulaciones recomendadas por el ACI, encontrándose muy buena aproximación en los resultados, lo que respalda la validez de nuestra expresión.

El Tercer Capítulo está referido a los Diagramas Adimensionales de Cortantes y Momentos, aquí para la misma cantidad de chimeneas se obtienen los diagramas de cortantes y momentos, correspondientes a un tipo de espectro de respuesta, variando cada uno de ellos, con el valor que se adopte para la relación entre el periodo fundamental de Vibración y el Periodo Predominante del Suelo (T_1/T_s).

Se ha logrado, con esta variación de la relación de periodos, obtener diagramas adimensionales máximos y mínimos de cortantes y momentos, asegurándose contemplar en dicho intervalo a todas las chimeneas reales que pudieran existir.

El Cuarto Capítulo, está referido al Método Estático Simplificado para determinar las Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores, aquí se analiza las Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores de las chimeneas adimensionales presentadas, con la finalidad de poder encontrar modelos que posean similares respuestas sísmicas.

Luego de realizada esta investigación, se encontró que la gama de modelos considerados inicialmente podía ser reducida a una cantidad mucho menor, estando identificado cada uno de ellos por el valor que adopta un parámetro característico.

En base a esta nueva gama, se propone un Método Estático simplificado para calcular las Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores de cualquier estructura continua tipo chimenea, consistiendo básicamente en determinar unos coeficientes que se encuentran en función de la relación de periodos T_1/T_s que posea.

El Quinto Capítulo, está referido al Diseño Sísmico de Chimeneas en Voladizo de Sección Circular Empotradas en la

Base - Planteamiento de Normas para el R.N.C. - Perú, aquí se resumen los resultados investigados en esta Tesis, indicándose los pasos que el Proyectista debe seguir para diseñar cualquier chimenea.

Además, se comparan las repuestas sísmicas encontradas en dos chimeneas reales, aplicando el Método Estático propuesto y luego el Método Dinámico escogido. Como resultado de dicha comparación, se observa que el Método planteado es en todos los casos conservador con valores muy cercanos a los obtenidos empleando el Método Dinámico.

Finalmente, en el Sexto Capítulo, se encuentran las Conclusiones y Recomendaciones, que se han podido desprender de esta investigación.

Es deseo del autor, que este Planteamiento de Normas pueda servir de base para su inclusión en un futuro Reglamento Sísmico Peruano, tema que actualmente el Reglamento no contempla.

CAPITULO 1

ANALISIS DINAMICO DE CHIMENEAS

Una gran mayoría de estructuras en ingeniería pueden modelarse y analizarse como sistemas con masas concentradas, tal es el caso de edificaciones, donde las masas se concentran a nivel de cada piso, reduciéndose así el número de grados de libertad de la estructura, y por consiguiente la simplificación del análisis (3).

Sin embargo, el problema se presenta al querer analizar estructuras continuas como chimeneas, donde su masa se distribuye a lo largo de su altura y teóricamente tiene infinitos grados de libertad.

Pretendemos, en este capítulo, demostrar que una chimenea puede ser modelada como un sistema de masas concentradas unidas por soportes elásticos de peso despreciable; encontraremos que para una determinada partición de la estructura, las frecuencias circulares de cada modo, son aproximadamente las mismas que las obtenidas analizándola como un sistema de masa continua.

1.1 MODELAJE DE LA CHIMENEA

En este estudio, el sistema de masa distribuida o continua es modelado como una viga en voladizo de sección variable, cuya altura es mucho mayor comparada con las dimensiones de su sección transversal y las pequeñas deflexiones que pudiera tener (ver figura 1).

En la figura 2, podemos apreciar como la chimenea ha sido idealizada como un sistema de masas concentradas

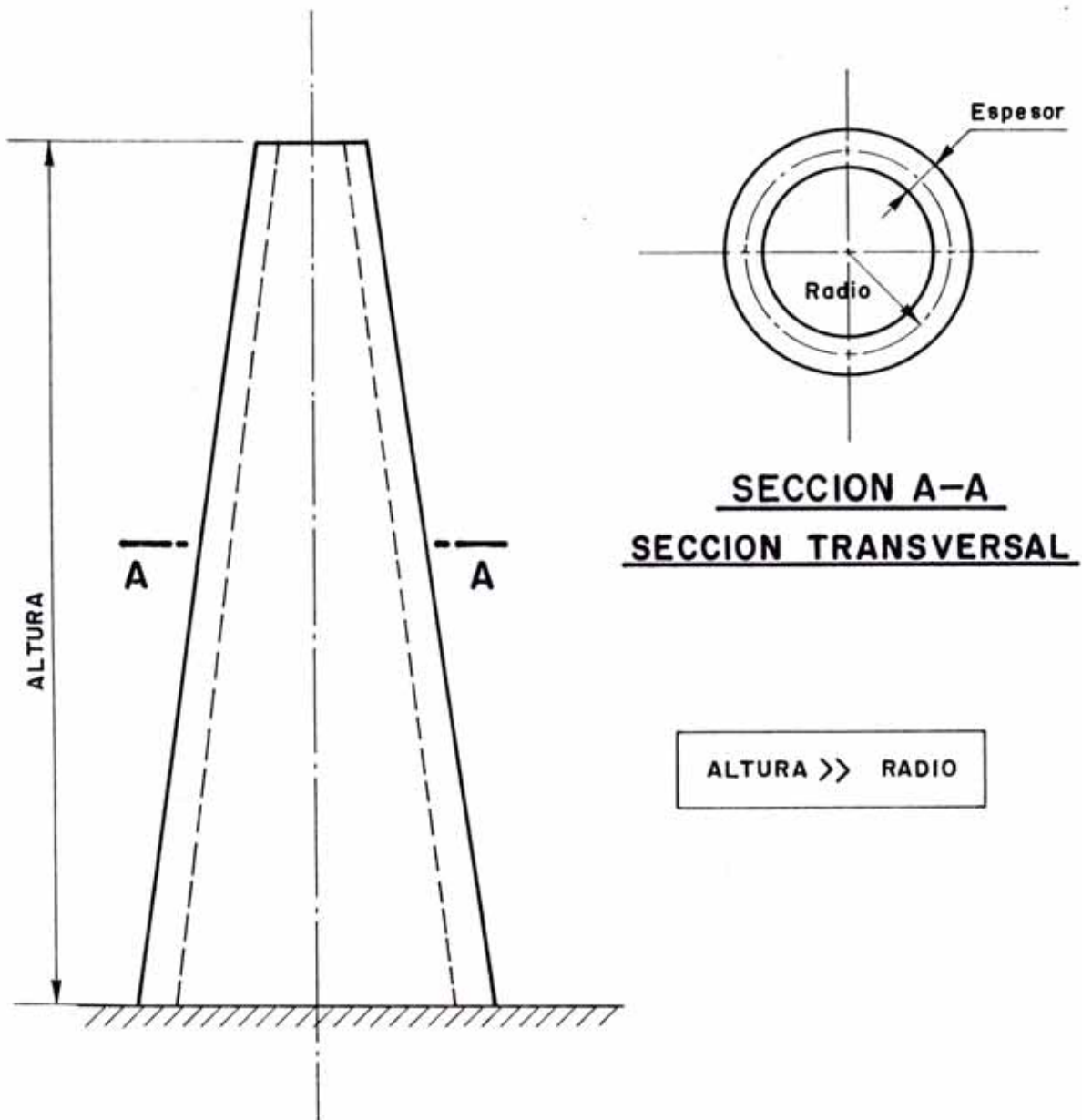
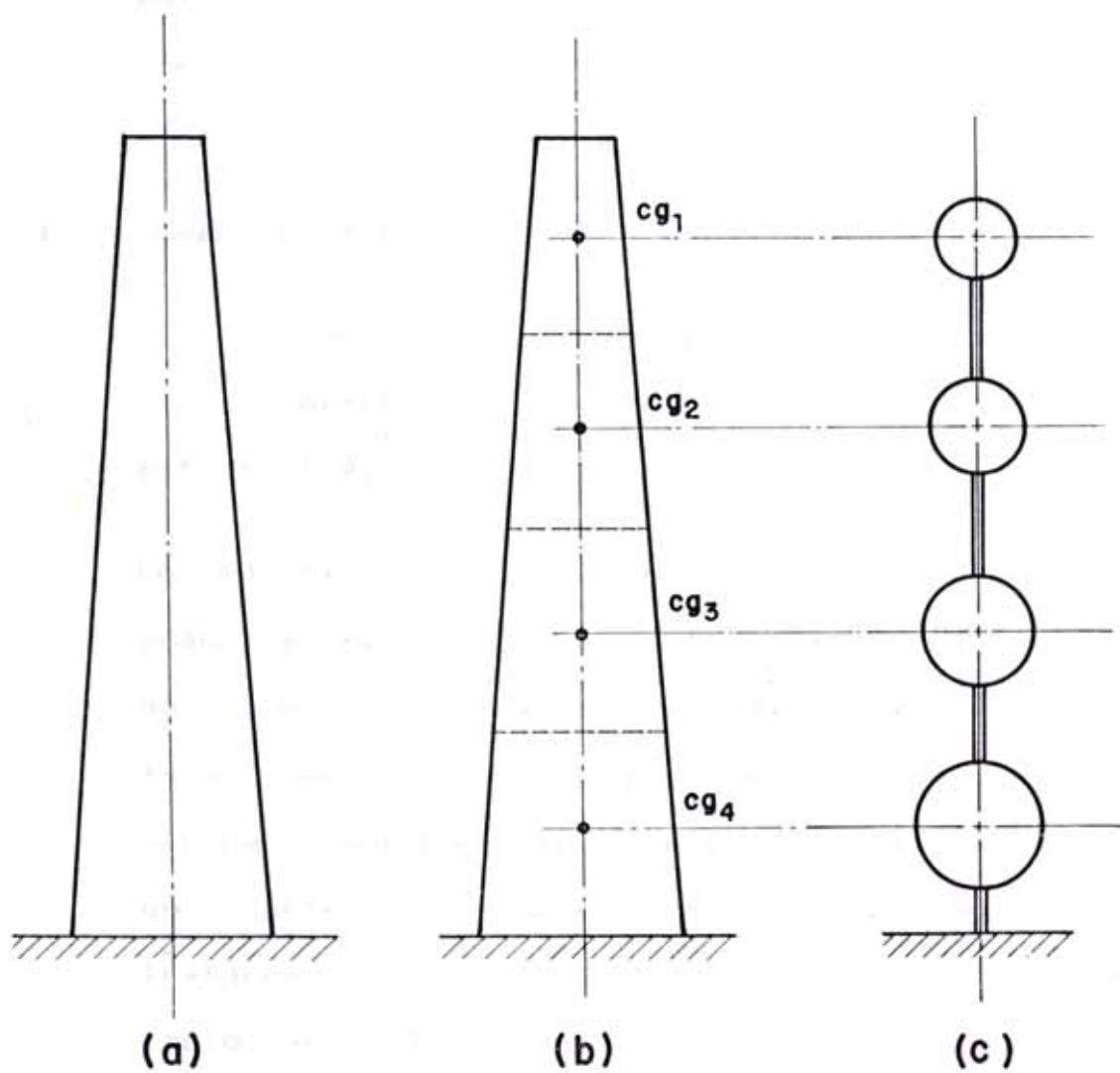


FIG. 1.- CONDICIONES QUE SE DEBEN CUMPLIR EN UNA CHIMENEA.



- a) - Chimenea real de sección variable empotrada en la base.
- b) - Partición de la chimenea y ubicación del centro de gravedad de cada parte.
- c) - Chimenea idealizada como un sistema de masas concentradas.

FIG. 2.- MODELAJE DE LA CHIMENEA.

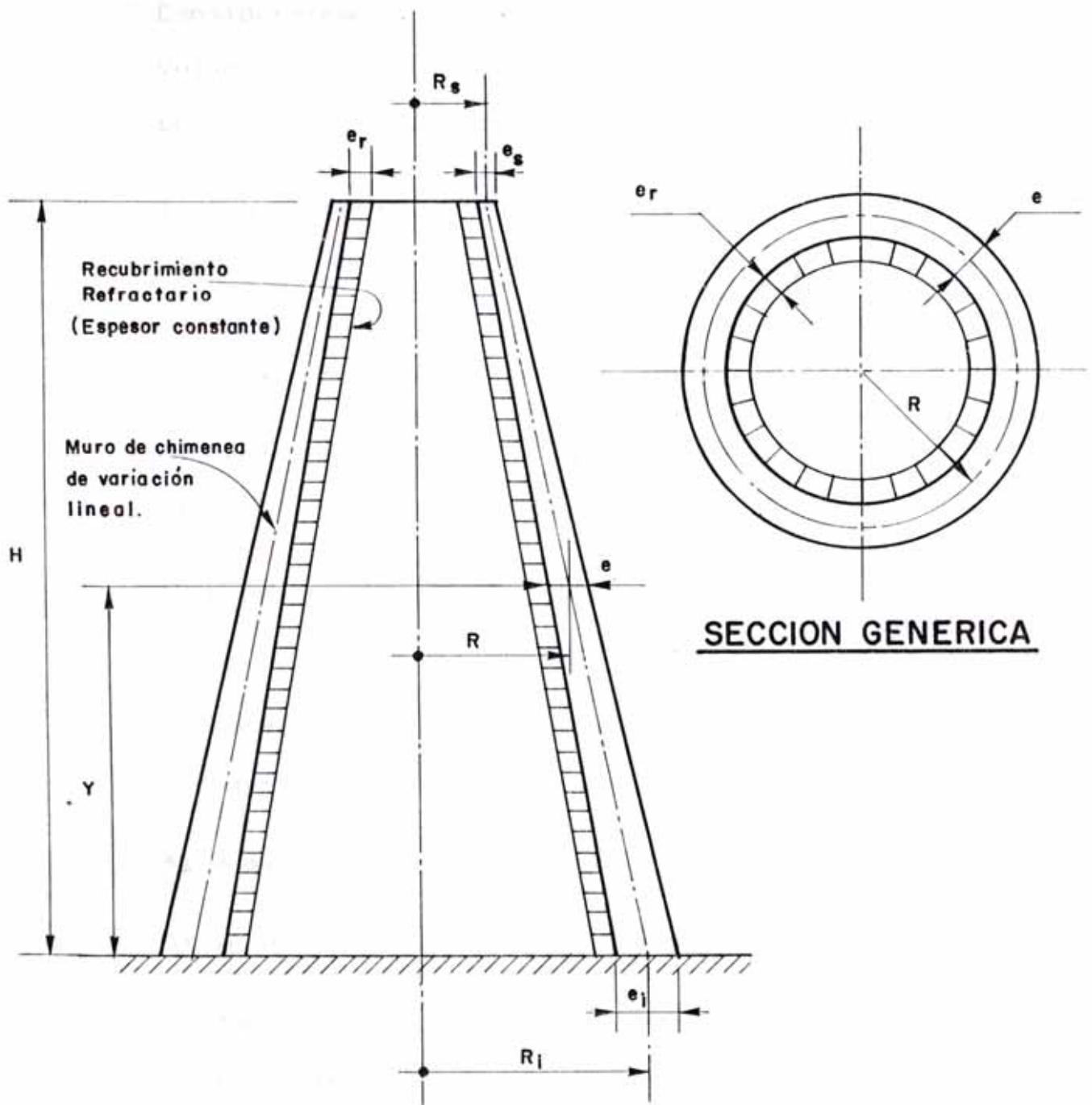
unidas por soportes elásticos de peso despreciable; de esta manera, demostraremos que analizar una estructura continua como una estructura discretizada, resulta más conservador y práctico (4).

1.2 CARACTERISTICAS FISICAS Y GEOMETRICAS

Una Chimenea de sección variable, representa el caso más genérico de la estructura continua que vamos a estudiar(14).

La mayoría de las chimeneas que se construyen en la práctica tienen como característica de que el espesor de la pared disminuye con la altura y también pueden tener radio variable que disminuye de abajo hacia arriba. Puede darse el caso de que estas dos variables no varíen linealmente. En el presente trabajo trataremos el caso en que el espesor de la pared y el radio varían linealmente.

En la figura 3 podemos apreciar las características geométricas que definen a la chimenea (ver anexo A), además, estamos considerando el recubrimiento refractario que interiormente tendrá, con el objeto de proteger su superficie que estará en contacto con el humo que desaloja, conformado muchas veces por gases tóxicos y vapores de elevada temperatura.



DONDE:

- H = Altura de la chimenea.
- R_s = Radio medio superior.
- e_s = Espesor superior.
- R_i = Radio medio inferior.
- e_i = Espesor inferior.
- e_r = Espesor de recubrimiento refractario.
- Y = Altura en donde se encuentra la sección genérica, de radio medio R y espesor e.

FIG. 3.- CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DE LA CHIMENEA DE SECCION VARIABLE ESTUDIADA.

Consideraremos a la Chimenea como un elemento en Voladizo de CONCRETO ARMADO y con las siguientes principales características:

1) Peso Específico: $\delta_c = 2.4 \text{ ton/m}^3$

2) Módulo de Elasticidad: $E = 150000 \cdot \sqrt{f'c} \text{ ton/m}^2$

donde "f'c" representa la resistencia cilíndrica a la compresión de una probeta de concreto.

3) Radio Medio: $R = R_i \cdot \left[\left(\frac{R_s}{R_i} - 1 \right) \cdot \frac{Y}{H} + 1 \right]$

Espesor: $e = e_i \cdot \left[\left(\frac{e_s}{e_i} - 1 \right) \cdot \frac{Y}{H} + 1 \right]$

donde "Y" es la distancia medida desde la base hasta la sección genérica en estudio.

4) Momento de Inercia: $I = \pi \cdot R \cdot e \cdot \left(R^2 + \frac{e^2}{4} \right)$

5) Intensidad de Masa: $m = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot e \cdot \delta_c / g$

donde "g" es igual 9.81 cm/seg^2 , correspondiente a la aceleración de la gravedad.

6) Recubrimiento: $\delta_r = 1.9 \text{ Ton/m}^3$

donde " δ_r " representa el peso específico de la albañilería de ladrillo refractario.

1.3 METODOS DE ANALISIS

Una chimenea puede ser analizada de distintas maneras, considerándola como una estructura continua o como un sistema de n grados de libertad.

Para obtener los valores exactos de las frecuencias propias de oscilación de una estructura continua sometida a la acción del movimiento sísmico son necesarios una serie de cálculos especialmente complicados, pudiéndose simplificar si suponemos concentradas las masas, tal como se muestra en la figura 2.

Si nos basamos en esta hipótesis simplificadora y tenemos en cuenta los esquemas que se hacen en el cálculo elástico y las restantes hipótesis sobre las características fisomecánicas de los materiales, llegamos a la conclusión que la llamada frecuencia exacta que obtenemos es, de hecho, un tanto aproximada (5).

Es evidente que la exactitud hace referencia únicamente a la resolución de la ecuación de la frecuencia, establecida a partir de premisas aproximadas.

Por ello, está justificado utilizar métodos aproximados o fórmulas directas para hallar las frecuencias o periodos propios de oscilación, tanto más cuanto que su utilización reduce mucho el tiempo de trabajo y simultáneamente evita las sorpresas de los errores de

cálculo.

A continuación daremos algunas nociones generales sobre la dinámica de los sistemas elásticos y luego describiremos los tres métodos de análisis elegidos, que se refieren a la oscilación de chimeneas, considerándola como un sistema de infinitos grados de libertad (estructura continua) o como un sistema de "n" grados de libertad (estructura representada por masas concentradas), haciendo finalmente las comparaciones pertinentes.

1.3.1 Nociones Generales sobre la Dinámica de los Sistemas Elásticos

Exponemos en forma resumida algunos aspectos teóricos de las oscilaciones de los sistemas elásticos, para ayudar a comprender los métodos de cálculo de la acción de los terremotos sobre las estructuras, basados en sus efectos dinámicos (5).

Cualquier sistema elástico puede oscilar libremente a consecuencia de un impulso inicial, o forzosamente por la acción de fuerzas perturbadoras periódicas o no periódicas. En el análisis de estos sistemas se puede tener en cuenta el efecto del amortiguamiento o prescindir de él. Los elementos principales que caracterizan a un sistema oscilatorio son:

FRECUENCIA DE OSCILACION, que representa el número de oscilaciones en el sistema producidos en la unidad de tiempo.

AMPLITUD, que es la distancia máxima que alcanzan los puntos del sistema medida a partir de la posición estática de equilibrio.

Finalmente, se denomina GRADO DE LIBERTAD DINÁMICA de un sistema oscilante al número de enlaces simples (parámetros), que pueden caracterizar la posición de este sistema elástico.

En este trabajo, trataremos sucintamente los problemas de la dinámica de los sistemas elásticos, considerando solamente el cálculo lineal.

Sistemas con un solo grado de libertad

La forma más sencilla de oscilación, a la que reduciremos en lo posible los fenómenos de oscilación, es la armónica. Por ello, consideraremos en primer lugar este tipo de oscilación.

La figura 4 muestra un sistema oscilatorio formado por una ménsula de rigidez conocida, accionada por un peso de masa M , situado en su extremo libre.

Este sistema es clásico en Ingeniería Sísmica y se denomina péndulo.

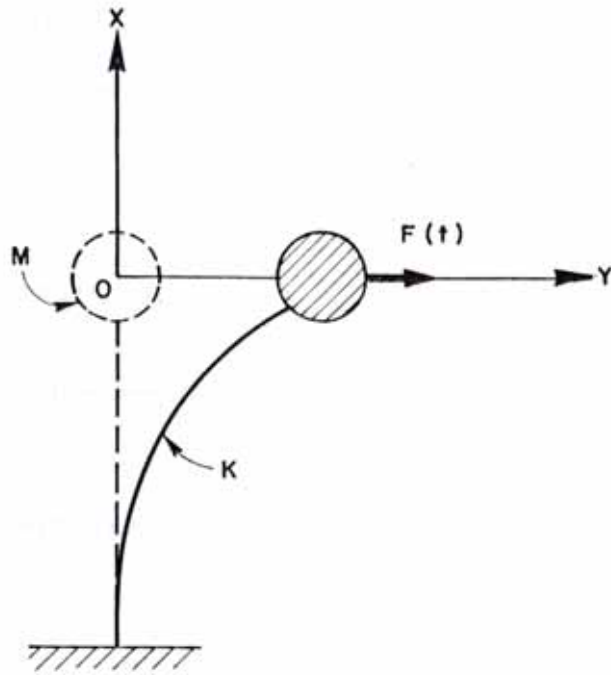
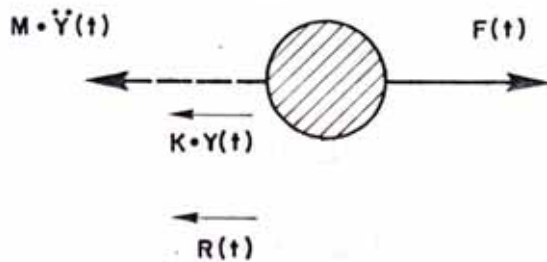


FIG. 4.- SISTEMA CON UN SOLO GRADO DE LIBERTAD TIPO PENDULO.



ECUACION DE EQUILIBRIO
DINAMICO DEL SISTEMA.

Donde:

$$M \cdot \ddot{Y}(t) + R(t) + K \cdot Y(t) = F(t)$$

FIG. 5.- DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA MASA M

En este sistema se admite que la masa propia del soporte elástico (elemento de rigidez K) es despreciable respecto a la masa M . El origen del sistema de coordenadas XOY se situa en el centro de la masa M y en su posición de equilibrio estático.

Si hacemos un diagrama de cuerpo libre de la masa M y ubicamos las fuerzas externas e internas, tendremos el equilibrio dinámico que se muestra en la figura 5, donde:

M = Masa de Peso P en $\text{Kg}\cdot\text{seg}^2/\text{cm}$.

$R(t)$ = Fuerza Resistente debida al rozamiento interno en Kg , variable en función del tiempo.

K = Constante elástica del sistema en Kg/cm .

$F(t)$ = Fuerza Perturbadora Exterior en Kg , variable en función del tiempo.

Casos particulares de oscilación

Se tendrá en cuenta dos casos de oscilación, con el objeto de demostrar la aproximación de ellos, y la simplificación que se obtiene al trabajar con solo uno.

1er caso : Oscilaciones Libres sin Amortiguamiento

Se llama oscilación libre o propia, la que toma un sistema elástico a consecuencia de un

impulso inicial.

Haciendo $F(t)=0$ (por tratarse de oscilaciones libres) y $R(t)=0$ (por no existir amortiguamiento), en la Ecuación del Equilibrio Dinámico mostrada en la figura 5, obtenemos la siguiente ecuación del movimiento:

$$M \cdot \ddot{Y}(t) + K \cdot Y(t) = 0$$

$$\text{ó } \ddot{Y}(t) + W \cdot Y(t) = 0 \quad \dots (1)$$

en la que W es la pulsación del movimiento, expresada por:

$$W = \sqrt{K/M} = \sqrt{g/Y_{\max}^{st}} \approx 31.3 / \sqrt{Y_{\max}^{st}} \quad (\text{c.p.s.})$$

en la que Y_{\max}^{st} (en cm) representa la flecha estática producida por el peso P , medida en la dirección de la oscilación del sistema. La pulsación o frecuencia circular se mide en radianes por segundo.

La solución de la ecuación (1) es:

$$Y(t) = C1 \cdot \text{Cos } Wt + C2 \cdot \text{Sen } Wt$$

Considerando las condiciones iniciales siguientes:

para $t = 0$, $Y(0) = Y_0$, $\dot{Y}(0) = V_0$.

$$\text{resulta: } Y(t) = Y_0 \cdot \text{Cos } Wt + \frac{V_0}{W} \cdot \text{Sen } Wt \quad \dots (2)$$

$$\text{ó } Y(t) = A \cdot \text{Cos } (Wt - \epsilon) \quad \dots (3)$$

donde:

$$A = \sqrt{Y_0^2 + \left(\frac{V_0}{W}\right)^2}$$

representa el desplazamiento máximo o amplitud de oscilación.

y

$$\varepsilon = \text{arc tg} \left(\frac{V_0}{Y_0 \cdot W} \right)$$

representa la fase de oscilación.

En estas condiciones la ecuación (3) puede escribirse:

$$Y(t) = \sqrt{Y_0^2 + \left(\frac{V_0}{W}\right)^2} \cdot \text{Cos} \left(Wt - \text{Arc tg} \frac{V_0}{Y_0 \cdot W} \right) \dots (4)$$

También aparece en los cálculos la noción de frecuencia "f" y periodo del movimiento "T".

La frecuencia queda definida por:

$$f = \frac{W}{2\pi} \approx \frac{5}{\sqrt{Y_{\max}^{st}}} \quad (\text{en herz}) \quad \dots (5)$$

Y el periodo, tiempo en el que la masa efectúa una oscilación completa, queda expresado por:

$$T = \frac{2\pi}{W} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = \frac{1}{f} \quad (\text{en segundos})$$

El periodo también puede deducirse directamente de la expresión:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Y_{\max}^{st}}{g}} \approx 0.2 \sqrt{Y_{\max}^{st}} \quad \dots (6)$$

De la ecuación del movimiento se deduce que la amplitud "A" y la fase "ε", de las oscilaciones dependen del impulso y posición inicial.

La frecuencia y periodo propio dependen únicamente de las características físicas del sistema (la masa M y la rigidez K).

2do caso : Oscilaciones Libres con Amortiguamiento Viscoso

Se considera que la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad, según la hipótesis de Voigt.

Por consiguiente, la fuerza de amortiguamiento será:

$$R(t) = \beta \cdot \dot{Y}(t)$$

Siendo "β" un coeficiente de proporcionalidad.

Como la ecuación de las oscilaciones libres amortiguadas es:

$$M \cdot \ddot{Y}(t) + R(t) + K \cdot Y(t) = 0$$

entonces, tendríamos:

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{Y}(t) + \beta \cdot \dot{Y}(t) + K \cdot Y(t) &= 0 \\ \text{ó } \ddot{Y}(t) + 2 \cdot \epsilon \cdot \dot{Y}(t) + W^2 \cdot Y(t) &= 0 \quad \dots (7) \end{aligned}$$

donde se ha introducido el factor $\epsilon = \beta/2M$,

llamado factor de amortiguamiento, cuya determinación se hace posteriormente.

La solución general de la ecuación (7), si se considera un amortiguamiento pequeño ($W > \epsilon$), será:

$$Y(t) = e^{-\epsilon t} \cdot A \cdot \cos(W^0 t - \xi^0) \quad \dots (8)$$

donde:

$$A = \sqrt{Y_0^2 + \left(\frac{V_0 + \epsilon Y_0}{W^0}\right)^2}$$

es la amplitud del movimiento,

$$\xi^0 = \arctg\left(\frac{V_0 + \epsilon Y_0}{Y_0 \cdot W^0}\right)$$

es la fase de oscilación, y

$$W^0 = \sqrt{W^2 - \epsilon^2}$$

es la frecuencia del movimiento libre amortiguado.

Aquí hemos considerado las mismas condiciones iniciales del caso anterior.

El periodo del movimiento amortiguado es:

$$T^0 = \frac{2\pi}{W^0} = \frac{2\pi}{\sqrt{W^2 - \epsilon^2}}$$

La expresión (8) puede escribirse de la siguiente forma:

$$Y(t) = e^{-\epsilon t} \sqrt{Y_0^2 + \left(\frac{V_0 + \epsilon Y_0}{W^0}\right)^2} \cdot \text{Cos}(W^0 t - \xi^0) \dots (9)$$

en la figura 6 se da la solución gráfica de esta ecuación.

Según puede observarse, el amortiguamiento origina una disminución de la frecuencia propia y, por consiguiente, un aumento del periodo.

La relación de las dos amplitudes sucesivas será:

$$\frac{Y_1(t)}{Y_2(t)} = \frac{A \cdot e^{-\epsilon t}}{A \cdot e^{-\epsilon(t+T^0)}} = e^{\epsilon T^0}$$

que implica que decrecen según una progresión geométrica.

El decremento logarítmico será:

$$\delta = \text{Ln} \frac{Y_1(t)}{Y_2(t)} = \epsilon \cdot T^0 \dots (10)$$

que puede calcularse por vía experimental midiendo dos amplitudes sucesivas en el registro real del movimiento.

En Ingeniería Sísmica se trabaja normalmente con el factor de amortiguamiento " μ ", igual al cociente entre el factor de amortiguamiento " ϵ " y la velocidad angular o pulsación W^0 .

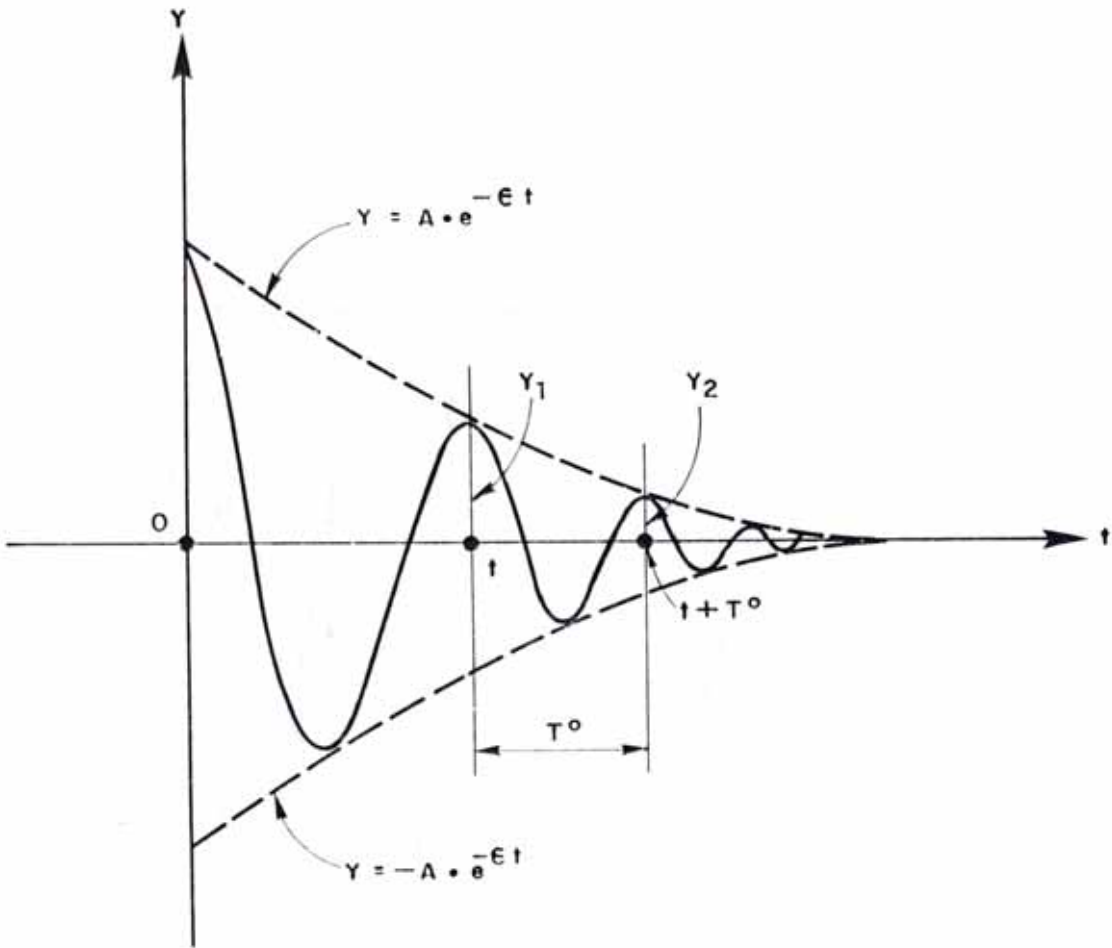


FIG. 6.- REPRESENTACION GRAFICA DE LA OSCILACION LIBRE AMORTIGUADA SEGUN LA ECUACION 9.

$$\mu = \frac{\epsilon}{W^0} = \frac{\epsilon T^0}{2\pi} = \frac{\delta}{2\pi}$$

El factor crítico de amortiguamiento corresponde al momento en que el movimiento pierde su carácter oscilatorio ($\mu=1$). En general, " μ " es menor que 1 y para estructuras normales es menor que 0.2. Si se utiliza el factor crítico de amortiguamiento, los valores antes deducidos pueden expresarse en la forma:

$$\epsilon = \mu \cdot W^0 = \mu \sqrt{W^2 - \epsilon^2} = \mu \cdot W \sqrt{1 - \frac{\epsilon^2}{W^2}} = \mu \cdot W \sqrt{1 - \mu^2} \approx \mu \cdot W$$

$$W^0 = W \sqrt{1 - \mu^2} \approx W$$

$$T^0 = \frac{2\pi}{W \sqrt{1 - \mu^2}} \approx T$$

$$A = \sqrt{Y_0^2 + \left(\frac{V_0 + \mu \cdot W \cdot Y_0}{W \sqrt{1 - \mu^2}} \right)^2} \approx \sqrt{Y_0^2 + \left(\frac{V_0}{W} + \mu \cdot Y_0 \right)^2} \dots (11)$$

$$\text{tg } \xi^0 = \frac{V_0 + \mu \cdot W \cdot Y_0}{Y_0 \cdot W \sqrt{1 - \mu^2}} \approx \frac{V_0}{Y_0 \cdot W} + \mu$$

la ecuación del movimiento (9) se convierte en:

$$Y(t) = e^{-\mu \omega t} \sqrt{Y_0^2 + \left(\frac{V_0}{W} + \mu \cdot Y_0 \right)^2} \cdot \text{Cos} (\omega t - \xi^0) \dots (12)$$

En los sistemas elásticos que se tratan en Ingeniería Sísmica, " μ " es aproximadamente igual a 0.1 (caso de las estructuras de concreto armado), μ^2 puede despreciarse, por lo que $\sqrt{1 - \mu^2} \approx 1$.

En consecuencia, puede considerarse en la práctica, que la pulsación o frecuencia circular de un sistema oscilatorio con amortiguamiento viscoso o sin él, son iguales resultando por tanto que: $\omega^0 = \omega$ y $T^0 = T$

1.3.2 Método de los Elementos Continuos

Las vibraciones de flexión en estructuras tipo chimeneas, constituye otro de los problemas clásicos de infinitos grados de libertad (11).

Partimos de la hipótesis fundamental de deformaciones pequeñas.

Con objeto de tener vibraciones de flexión en un plano fijo (plano horizontal) sin acoplamientos con torsión, compresión - torsión o flexiones en otro plano, suponemos que:

- a) La chimenea tiene un eje elástico recto considerado en el sentido de que las cargas que pasan por él no producen torsión en ninguna sección.
- b) Las secciones transversales perpendiculares al eje elástico tienen sus ejes principales dirigidos horizontalmente.
- c) El eje de gravedad, lugar geométrico de los centros de gravedad de las secciones

transversales, coinciden con el eje elástico.

- d) Las cargas aplicadas se consideran horizontales, y pasan por el eje elástico.
- e) Las perturbaciones iniciales se consideran en dirección horizontal, siendo de igual valor para cualquier punto de una sección que las dadas al centro de cortadura.

En las hipótesis anteriores la chimenea vibrará flexionando en el plano horizontal, según como se muestra en la figura 7.

donde:

$m(y)$ = es la masa por unidad de longitud

$EI(y)$ = el módulo de rigidez a la flexión

$Q(y,t)$ = la carga por unidad de longitud

$V(y,t)$ = la fuerza cortante

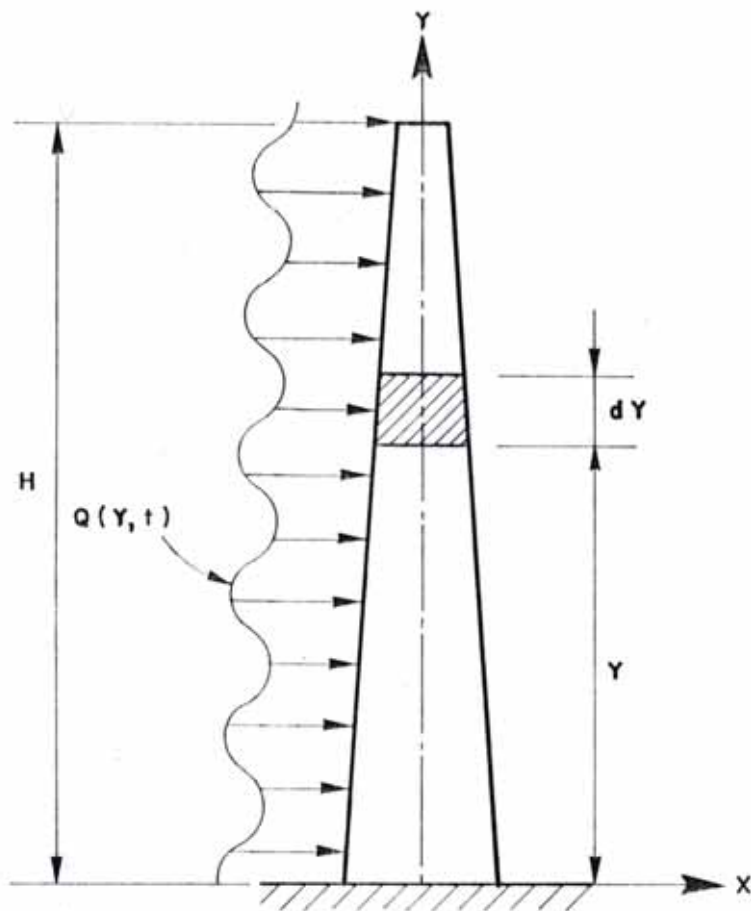
$M(y,t)$ = el momento flector

x = la deflexión horizontal a partir de la posición de equilibrio estático

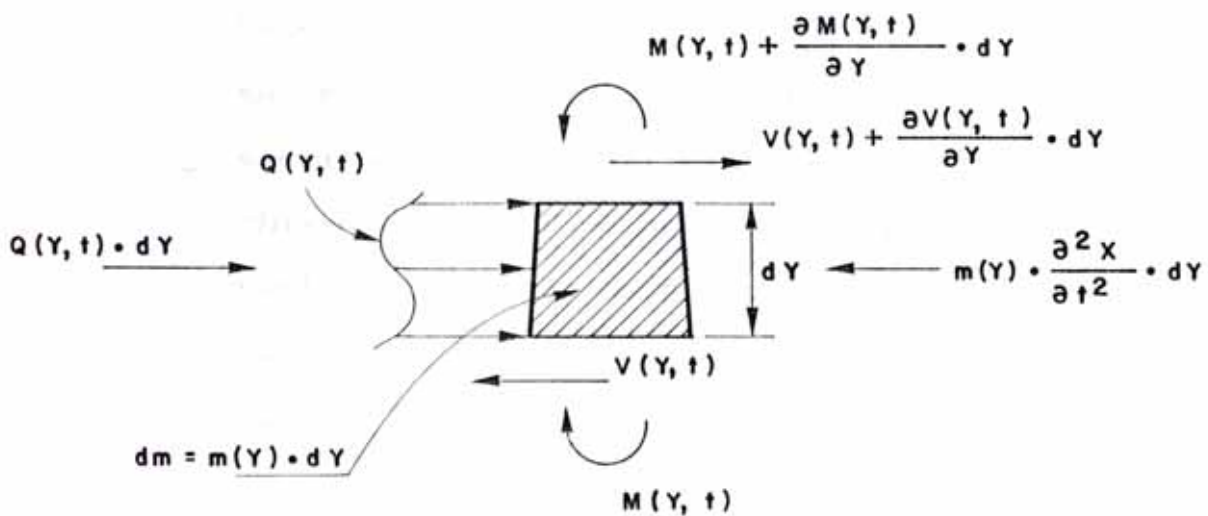
y = la posición genérica en estudio medida a partir de la base

t = representa a la unidad de tiempo

Del equilibrio del elemento de la chimenea, según fórmulas conocidas, tenemos (véase figura anterior):



(a)



(b)

a).- Muestra a la chimenea como una viga en voladizo sometida a la acción de la carga perturbadora $Q(Y, t)$

b).- Muestra el diagrama de cuerpo libre de un elemento diferencial de la chimenea.

FIG.7 .- METODO DE LOS ELEMENTOS CONTINUOS.

$$V + \frac{\partial V}{\partial y} \cdot dy + Q \cdot dy = V + m \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \cdot dy$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = -Q + m \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

pero:

$$\frac{\partial M}{\partial y} = V \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} = -\frac{M}{EI}$$

luego:

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[EI \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} \right] + m \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = Q \quad \dots (1)$$

que constituye la ECUACION DIFERENCIAL en su forma más general.

Esta ecuación presenta muchos inconvenientes en su resolución para una estructura continua de sección transversal variable como lo es una chimenea. Hacer un análisis completo resultaría bastante largo y podríamos decir que complicado debido a las diversas posibilidades en que pueden variar las variables enunciadas, motivo por el cual la obtención de una solución analítica sencilla expresada mediante una fórmula, es prácticamente difícil de encontrar.

El Ingeniero Juan Chávez (7) logró resolver esta ecuación para un tipo particular de estructura en voladizo y maciza cuya sección transversal es también circular pero no hueca como es el caso de

una chimenea. La solución que plantea está conformada por las primeras y segundas funciones de Hankel y Bessel, las que resuelven la ecuación diferencial simplificada, llegándose a formar, luego de reemplazarse las condiciones de borde, una determinante que fue resuelta empleando un programa de cómputo y de la cual se obtiene las frecuencias naturales y formas de Modo del Sistema.

Para el caso particular de una chimenea de sección transversal uniforme, las características elásticas (EI) y máxicas (m) permanecen constantes en todo lo alto de la estructura.

La carga excitadora está representada por una función armónica.

Por consiguiente tendremos que:

$$EI(y) = EI, \quad m(y) = m, \quad Q(y,t) = m \cdot q \cdot \text{sen } Wt$$

entonces la ecuación (1) se transforma en:

$$C^2 \cdot \frac{\partial^4 x}{\partial y^4} + \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = q \cdot \text{sen } Wt \quad \dots (2)$$

Siendo $C^2 = EI/m$ una constante que caracteriza a la chimenea.

El problema queda definido al completar la ecuación diferencial con las correspondientes

condiciones iniciales y de contorno.

Las primeras están determinadas al dar la perturbación inicial mediante dos funciones $F(y)$, $f(y)$, de forma tal que:

para $t = 0$, $x(y,0) = F(y)$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = f(y)$$

Las segundas están determinadas por el tipo de restricciones en los apoyos de la chimenea en estudio.

Considerando las vibraciones libres y, por tanto, respondiendo a la ecuación (2), tenemos que:

$$q = 0, \text{ entonces: } C^2 \cdot \frac{\partial^4 x}{\partial y^4} + \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0 \quad \dots (3)$$

Como la chimenea se encuentra empotrada en la base y libre en el extremo, tenemos:

$$\text{para } y = 0, \quad x(0,t) = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial x}{\partial y} = 0$$

$$\text{para } y = H, \quad \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial^3 x}{\partial y^3} = 0$$

Para hallar la integral general de la ecuación (3), seguimos el método de BERNOUILLE - EULER.

Sea la siguiente solución particular armónica, a utilizar:

$$x(y, t) = a(y) \cdot \text{Sen}(Wt + \alpha)$$

de donde:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -W^2 \cdot a(y) \cdot \text{Sen}(Wt + \alpha)$$

$$\frac{\partial^n x}{\partial y^n} = \frac{d^n a(y)}{dy^n} \cdot \text{Sen}(Wt + \alpha)$$

teniendo para el cálculo de $a(y)$ la ecuación diferencial ordinaria siguiente (8):

$$\frac{d^4 a(y)}{dy^4} - \frac{W^2}{C^2} \cdot a(y) = 0 \quad \dots (4)$$

luego, para $y = 0$, $a(0) = 0$, $\frac{da}{dy} = 0$

para $y = H$, $\frac{d^2 a}{dy^2} = 0$, $\frac{d^3 a}{dy^3} = 0$

pero la ecuación característica de la expresión (4) tiene las cuatro raíces siguientes:

$$\sqrt{\frac{W}{C}} , -\sqrt{\frac{W}{C}} , i\sqrt{\frac{W}{C}} , -i\sqrt{\frac{W}{C}}$$

por tanto, las cuatro soluciones exponenciales son:

$$e^{\sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y} \quad e^{-\sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y} \quad e^{i\sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y} \quad e^{-i\sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y}$$

o bien, pasando a funciones trigonométricas e hiperbólicas, tenemos como solución:

$$a(Y) = C_1 \text{Sen} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y + C_2 \text{Cos} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y + C_3 \text{Senh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y + C_4 \text{Cosh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y$$

en donde reemplazando las condiciones anteriores, llegamos al sistema siguiente:

$$C_2 + C_4 = 0$$

$$C_1 + C_3 = 0$$

$$-C_1 \operatorname{Sen} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H - C_2 \operatorname{Cos} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H + C_3 \operatorname{Senh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H + C_4 \operatorname{Cosh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H = 0$$

$$-C_1 \operatorname{Cos} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H + C_2 \operatorname{Sen} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H + C_3 \operatorname{Cosh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H + C_4 \operatorname{Senh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H = 0$$

cuya compatibilidad conduce a la ecuación:

$$\operatorname{Cos} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H = - \frac{1}{\operatorname{Cosh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H} \quad \dots (5)$$

Resolviendo la ecuación (5), ver figura 8, obtenemos las frecuencias naturales de vibración de cualquier chimenea de sección uniforme, teniendo cada una de ellas las siguientes expresiones:

$$W_1 = (0.597)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \cdot C \quad , \quad W_2 = (1.49)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \cdot C$$

$$W_3 = (2.5)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \cdot C$$

de donde se puede concluir que la frecuencia natural de vibración del enésimo modo será de la forma:

$$W_n = (n-0.5)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 \cdot C \quad , \quad \text{para } n \geq 3$$

Volviendo al sistema anterior, de donde expresamos C_2 , C_3 y C_4 en función de C_1 (al que designamos

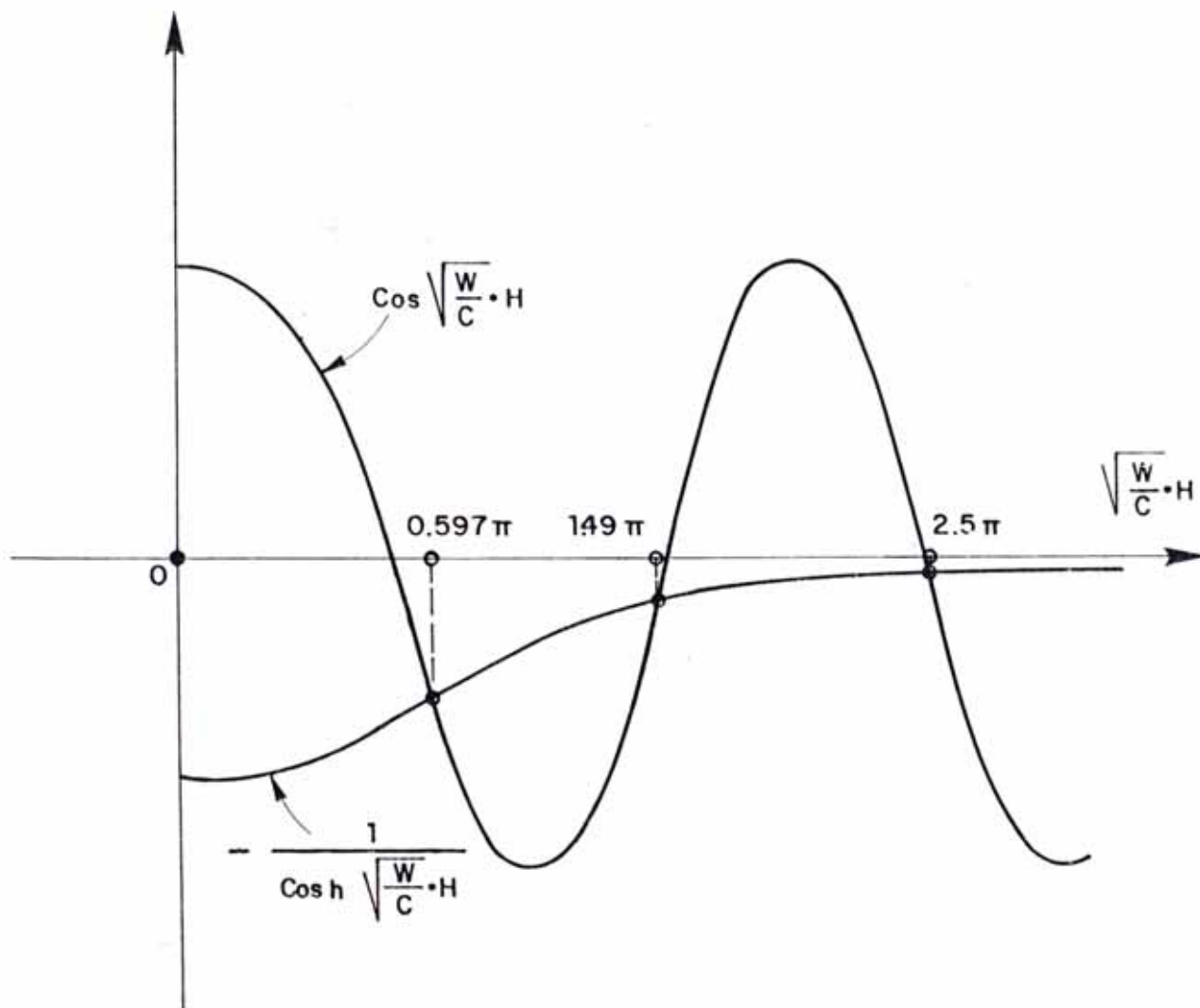


FIG. 8 REPRESENTACION GRAFICA DE LA ECUACION 5.

amos por "a"), se tiene:

$$C1 = -C3 = a$$

y por tanto:

$$a(Y) = a \cdot \left[\text{Sen} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y - \text{Senh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y + \left(\text{Cos} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y - \text{Cosh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot Y \right) \frac{\text{Cos} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H + \text{Cosh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H}{\text{Sen} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H - \text{Senh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H} \right] \\ = a \cdot r(Y) \quad \dots (6)$$

que nos determina las autofunciones o MODOS NATURALES DE VIBRACION del sistema mostrados en la figura 9, siendo estos iguales a:

$$a1 \cdot r1(y) , a2 \cdot r2(y) , \dots , an \cdot rn(y)$$

donde $ri(y)$ se obtiene al sustituir W por Wi en $r(y)$.

La solución general será por tanto:

$$X(y,t) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_i(Y) \cdot \text{Sen} (W_i t + \varphi_i)$$

donde la doble infinidad de constantes se determina a partir de las condiciones iniciales.

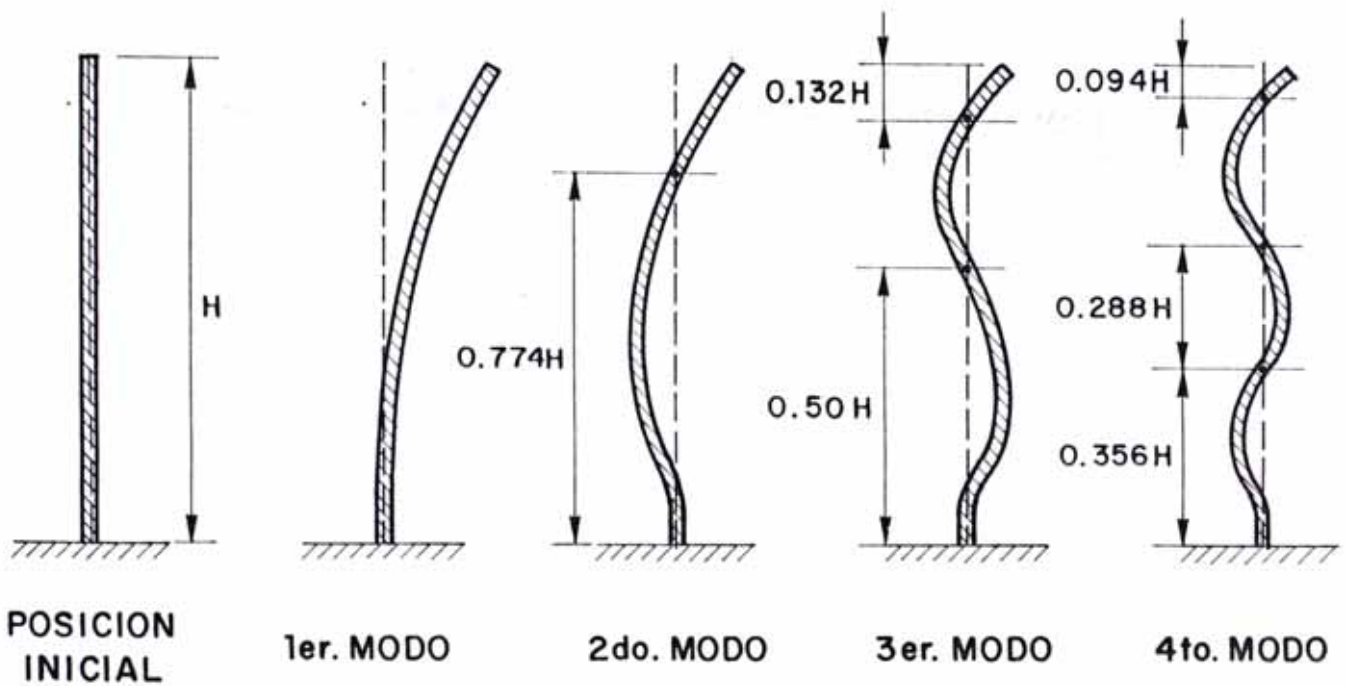
Factorizando : $\text{Cos} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H + \text{Cosh} \sqrt{\frac{W}{C}} \cdot H$ de la ecuación

6 y haciendo: $\sqrt{\frac{W}{C}} = \frac{Kn}{H}$ tenemos:

$$a(Y) = a \cdot (\text{Cos} Kn + \text{Cosh} Kn) \cdot \left[\frac{\text{Sen} (Kn \cdot Y/H) - \text{Senh} (Kn \cdot Y/H)}{\text{Cos} Kn + \text{Cosh} Kn} + \frac{\text{Cos} (Kn \cdot Y/H) - \text{Cosh} (Kn \cdot Y/H)}{\text{Sen} Kn - \text{Senh} Kn} \right]$$

$$\text{Sea} \quad Xn(y) = a(y)$$

$$Dn = a \cdot (\text{Cos} kn + \text{Cosh} Kn)$$



$$T_1 = 1.7872 \sqrt{\frac{m H^4}{E I}} \quad T_2 = 0.1596 T_1 \quad T_3 = 0.0570 T_1 \quad T_4 = 0.0291 T_1$$

Donde:

T_n = Período de vibración de la chimenea en el modo "n"-ésimo

H = Altura de la chimenea.

m = Masa de la chimenea por unidad de longitud.

E = Módulo de elasticidad.

I = Inercia de la sección transversal.

FIG. 9 MODOS NATURALES DE VIBRACION DE UNA CHIMENEA DE SECCION UNIFORME

entonces:

$$X_n(Y) = D_n \cdot \left[\frac{\text{Sen}(Kn \cdot Y/H) - \text{Senh}(Kn \cdot Y/H)}{\text{Cos} Kn + \text{Cosh} Kn} + \frac{\text{Cos}(Kn \cdot Y/H) - \text{Cosh}(Kn \cdot Y/H)}{\text{Sen} Kn - \text{Senh} Kn} \right] \dots (7)$$

donde:

H = Altura de la chimenea

y = Distancia medida a partir de la base

Dn = Constante arbitraria por cada modo de vibración

Xn(y) = Función característica que dá la forma de los diferentes modos de vibración para una chimenea de sección transversal uniforme (3)

Kn = Constante de la frecuencia de vibración del modo "n" (9)

n = 1,2 ... Modo de Vibración

Valores de Kn

n	1	2	3	4	5
Kn	1.875	4.694	7.855	10.996	14.137

donde, para n 2-3 la siguiente fórmula calcula aproximadamente el valor de Kn:

$$Kn = (n - 0.5) \cdot \pi \dots (8)$$

por tanto, las frecuencias naturales de vibración se obtienen de la siguiente expresión:

$$W_n = (K_n)^2 \cdot \left[\frac{EI}{m \cdot H} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots (9)$$

y los factores de participación de cada modo son:

$$A_n = \frac{\int_0^H m \cdot X_n(y) \cdot dy}{\int_0^H m \cdot X_n^2(y) \cdot dy} \quad \dots (10)$$

Los momentos flectores y fuerzas cortantes (10) correspondientes a uno de los modos de vibración, se pueden calcular utilizando las siguientes expresiones:

$$M_n(y) = EI \cdot \ddot{X}_n(y) \cdot A_n \cdot \frac{S_{an}}{W_n^2} \quad \dots (11)$$

$$V_n(y) = EI \cdot \dddot{X}_n(y) \cdot A_n \cdot \frac{S_{an}}{W_n^2} \quad \dots (12)$$

donde:

$$S_{an} = \frac{Z \cdot U \cdot S}{R_d} \cdot C_n \cdot g$$

es la aceleración espectral (17) que se obtiene a partir del periodo natural T_n , y las expresiones $\ddot{X}_n(y)$, $\dddot{X}_n(y)$, representan a la segunda y tercera derivada de la función característica, las que se muestran a continuación:

$$\ddot{X}(Y) = -D_n \left(\frac{K_n}{H} \right)^2 \cdot \left[\frac{\text{Sen}(K_n \cdot Y/H) + \text{Senh}(K_n \cdot Y/H)}{\text{Cos } K_n + \text{Cosh } K_n} + \frac{\text{Cos}(K_n \cdot Y/H) + \text{Cosh}(K_n \cdot Y/H)}{\text{Sen } K_n - \text{Senh } K_n} \right]$$

$$\dddot{X}(Y) = -D_n \left(\frac{K_n}{H} \right)^3 \cdot \left[\frac{\text{Cos}(K_n \cdot Y/H) + \text{Cosh}(K_n \cdot Y/H)}{\text{Cos } K_n + \text{Cosh } K_n} - \frac{\text{Sen}(K_n \cdot Y/H) - \text{Senh}(K_n \cdot Y/H)}{\text{Sen } K_n - \text{Senh } K_n} \right]$$

1.3.3 Método de Miklestad

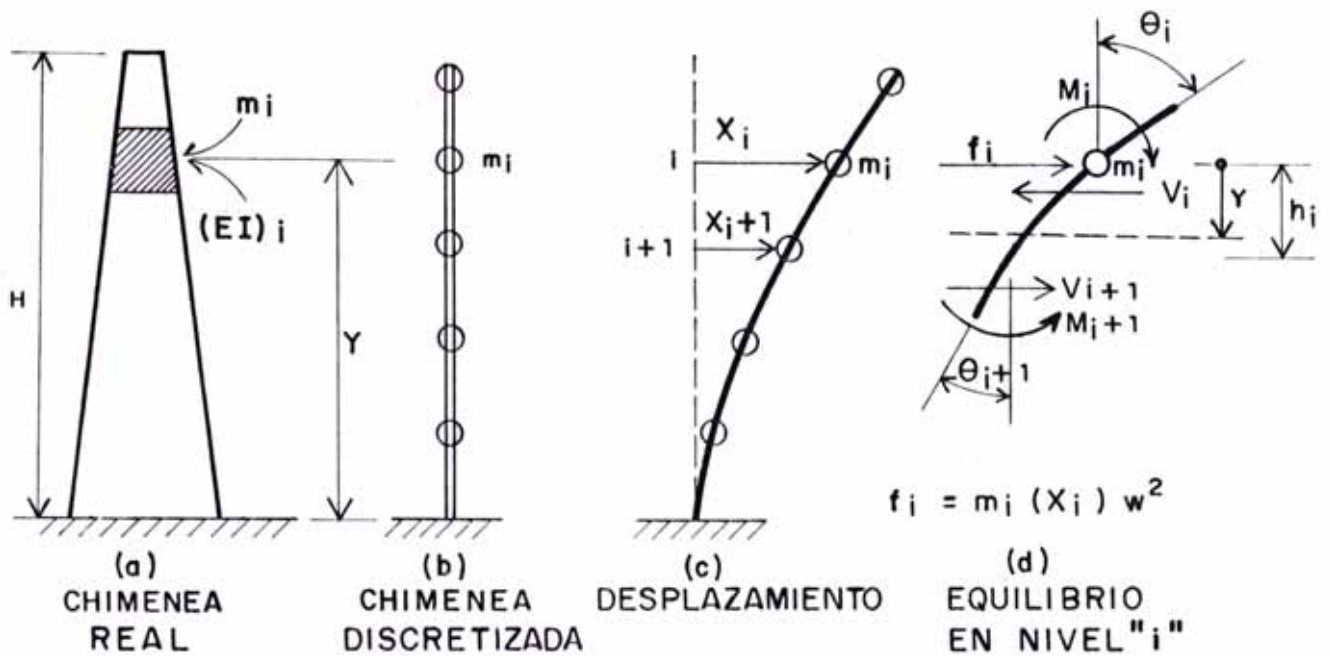
Cuando una estructura continua tipo chimenea es reemplazada por masas concentradas conectadas por soportes elásticos sin masa, se puede utilizar un método desarrollado por N.O. Myklestad para el cálculo progresivo de deflexión, pendiente, momento flector y fuerza cortante de una sección a la próxima, en forma similar al método Holzer (11).

En la figura 10a tenemos a una chimenea real mostrando en una sección típica sus características fundamentales como son su masa y el módulo de rigidez a la flexión.

La figura 10b muestra a la misma chimenea idealizada como un sistema de masas concentradas.

La figura 10c muestra los desplazamientos de dos secciones transversales consecutivas de la estructura idealizada.

Analizando una sección y según el diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 10d, podemos escribir ecuaciones para cortante y momento en $i+1$, enteramente en términos de cortante y momento en i . Finalmente, estas expresiones pueden sustituirse en las condiciones geométricas para θ e y .



Por condiciones de equilibrio:

$$V_{i+1} = V_i - m_i (X_i) w^2 \quad \dots\dots\dots \textcircled{a}$$

$$M_{i+1} = M_i - V_{i+1} \cdot h_i \quad \dots\dots\dots \textcircled{b}$$

Por resistencia de materiales:

$$\theta_{i+1} = \theta_i + M_{i+1} \left(\frac{h}{EI}\right)_i + V_{i+1} \left(\frac{h^2}{2EI}\right)_i \quad \dots\dots\dots \textcircled{c}$$

$$X_{i+1} = X_i + \theta_i h_i + M_{i+1} \left(\frac{h^2}{2EI}\right)_i + V_{i+1} \left(\frac{h^3}{3EI}\right)_i \quad \dots\dots\dots \textcircled{d}$$

Asumiendo "w" e iniciando en borde superior, se debe cumplir que:

$\theta_{base} = 0$ y $X_{base} = 0$ y se procede de manera similar al método HOLZER

FIG. 10 SECUENCIA DE ANALISIS DE LA CHIMENEA SEGUN EL METODO DE MYKLESTAD

Por condiciones de equilibrio tenemos:

$$V_{i+1} = V_i - m_i \cdot W^2 \cdot X_i \quad \dots (1)$$

$$M_{i+1} = M_i - V_{i+1} \cdot h_i \quad \dots (2)$$

de la Resistencia de Materiales, sabemos que:

$$\frac{d^2 X}{dy^2} = \frac{M}{EI}$$

luego, para una sección genérica en el tramo $i, i+1$ el momento será igual a:

$$M_y = M_{i+1} + V_{i+1} \cdot (h_i - y)$$

siendo "y" medida a partir de la sección i en estudio tal como se muestra en la figura 10(d), entonces:

$$\frac{d^2 X}{dy^2} = \left(\frac{1}{EI} \right)_i \cdot [M_{i+1} + V_{i+1} \cdot (h_i - y)]$$

el giro es igual a:

$$\theta = \frac{dX}{dy}$$

y el desplazamiento o deflexión, es representado por la variable X , luego:

$$\theta = \left(\frac{1}{EI} \right)_i \left[M_{i+1} \cdot y + V_{i+1} \cdot \left(h_i \cdot y - \frac{y^2}{2} \right) \right] + C_1 \quad \dots (3)$$

$$X = \left(\frac{1}{EI} \right)_i \left[M_{i+1} \cdot \frac{y^2}{2} + V_{i+1} \cdot \left(h_i \cdot \frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{6} \right) \right] + C_1 \cdot y + C_2 \quad \dots (4)$$

siendo las condiciones de borde las siguientes:

$$y = 0 \quad , \quad \theta = \theta_i \quad \text{e} \quad X = X_i \quad \dots (5)$$

$$y = h_i \quad , \quad \theta = \theta_{i+1} \quad \text{e} \quad X = X_{i+1} \quad \dots (6)$$

$$(5) \text{ en } (3) \text{ y } (4) : \quad C1 = \theta_i$$

$$C2 = X_i.$$

entonces:

$$\theta = \left(\frac{1}{EI} \right)_i \cdot \left[M_{i+1} \cdot y + V_{i+1} \cdot \left(h_i \cdot y - \frac{y^2}{2} \right) \right] + \theta_i \quad \dots (7)$$

$$X = \left(\frac{1}{EI} \right)_i \cdot \left[M_{i+1} \cdot \frac{y^2}{2} + V_{i+1} \cdot \left(h_i \cdot \frac{y^2}{2} - \frac{y}{6} \right) \right] + \theta_i \cdot y + X_i \quad \dots (8)$$

(6) en (7) y (8) :

$$\theta_{i+1} = \theta_i + M_{i+1} \cdot \left(\frac{h}{EI} \right)_i + V_{i+1} \cdot \left(\frac{h^2}{2EI} \right)_i \quad \dots (9)$$

$$X_{i+1} = X_i + \theta_i \cdot h_i + M_{i+1} \cdot \left(\frac{h^2}{2EI} \right)_i + V_{i+1} \cdot \left(\frac{h^3}{3EI} \right)_i \quad \dots (10)$$

donde los coeficientes de influencia son:

$\left[\frac{h}{EI} \right]_i$ = Pendiente en $i+1$ medida a partir de la tangente en i , debida a un momento unitario en $i+1$.

$\left[\frac{h^2}{2EI} \right]_i$ = Pendiente en $i+1$ medida a partir de la tangente en i , debida a una fuerza constante unitaria en $i+1$.

Deflexión en $i+1$ medida partiendo de la tangente en i , debida a un momento unitario en $i+1$.

$$\left[\frac{h^3}{3EI} \right]_i = \text{Deflexión en } i+1 \text{ medida a partir de una tangente en } i, \text{ debida a una cortante unitaria en } i+1.$$

Finalmente las ecuaciones (1), (2), (9) y (10), en la secuencia dada hacen posible pasar de i a $i+1$, como lo esperábamos.

De las cuatro condiciones de borde en cada extremo, se conocen dos; luego, en el extremo libre $i = 1$, se tendrá:

$$V_1 = M_1 = 0.$$

Como la amplitud es arbitraria, podemos escoger $X_1 = 1$, quedando la pendiente θ_1 fijada a un valor por determinar todavía.

Debido al carácter lineal del problema, las cuatro cantidades en el extremo más alejado serán de la forma:

$$V_n = a_1 + b_1 \cdot \theta_1$$

$$M_n = a_2 + b_2 \cdot \theta_1$$

$$\theta_n = a_3 + b_3 \cdot \theta_1$$

$$X_n = a_4 + b_4 \cdot \theta_1$$

En donde a_i y b_i son constantes y θ_1 , desconocida, de modo que las frecuencias que satisfacen la condición:

$$\theta_n = X_n = 0$$

establecerán el valor de θ_1 y las frecuencias naturales de la chimenea, es decir:

$$\theta_1 = -a_3/b_3$$

$$X_n = a_4 + b_4 \cdot (-a_3/b_3) = 0$$

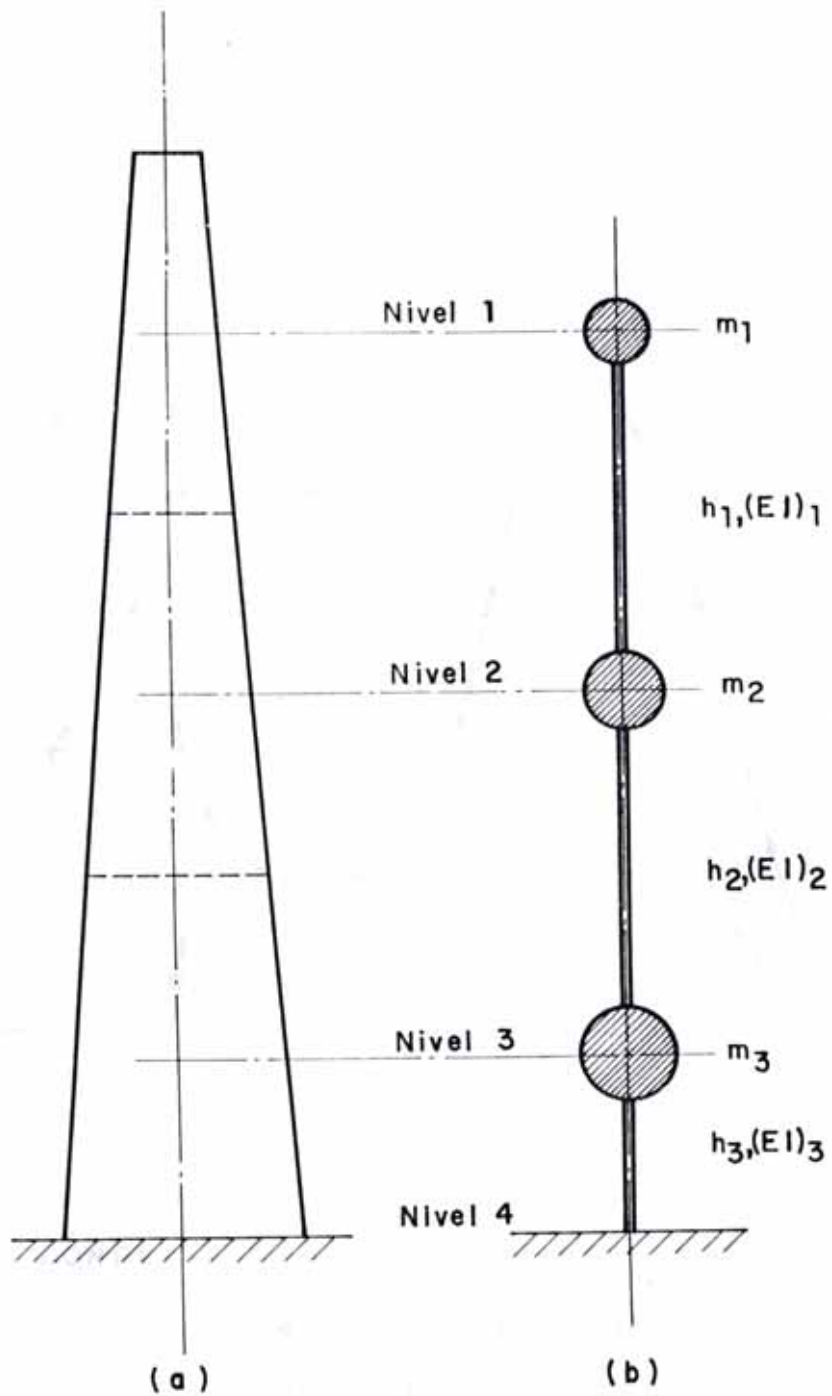
De donde, graficando W_n vs. X_n , pueden hallarse las frecuencias naturales de vibración de la chimenea.

Ejemplo de Aplicación: De la chimenea idealizada en la figura 11, hallaremos sus frecuencias naturales de vibración.

Se está considerando el caso más general en que la chimenea es de sección variable.

El método consiste en obtener, para una frecuencia determinada, la deflexión en la base de la chimenea igual a cero. Aparentemente esto es difícil de obtener, aún realizando muchos tanteos.

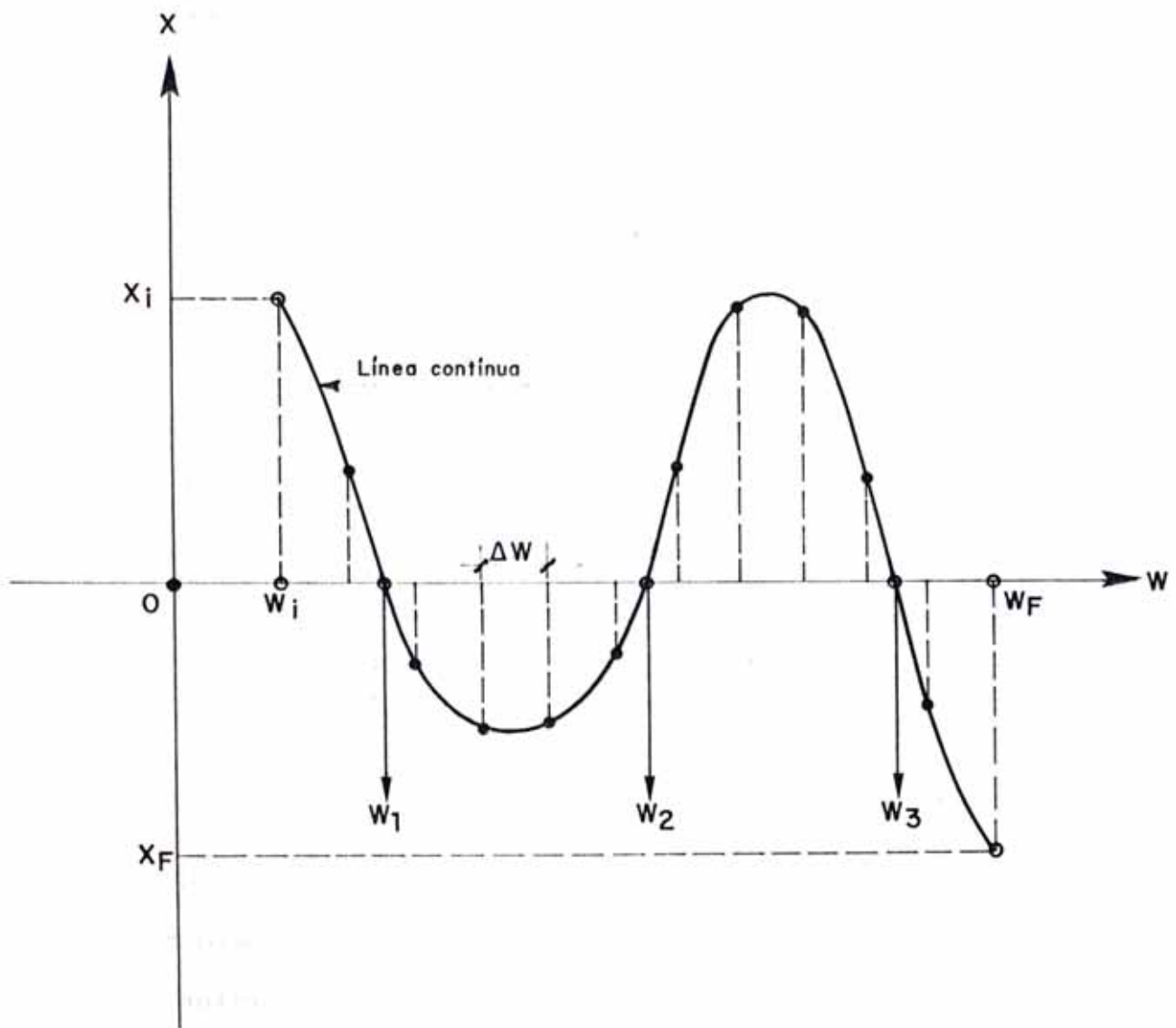
Haciendo un gráfico de frecuencias W vs. deflexión en la base X , tal como se muestra en la figura 12, podríamos trazar una línea continua a través de cada punto y encontrar aquellos en que se intercepte la curva trazada con el eje de las abscisas; dichos



a) - Chimenea real.

b) - Características de la chimenea idealizada como un sistema de masas concentradas.

FIG. 11 EJEMPLO USANDO EL METODO DE MYKLESTAD



DONDE :

W_i = Frecuencia inicial.

W_F = Frecuencia final.

ΔW = Incremento de frecuencia.

DEL GRAFICO SE ENCUENTRA :

W_1 = Frecuencia del primer modo.

W_2 = Frecuencia del segundo modo.

W_3 = Frecuencia del tercer modo.

FIG.12 GRAFICO DE FRECUENCIA (W) VS DEFLEXION EN LA BASE (X)

puntos serán los que posean una frecuencia natural que originen en la base una deflexión igual a cero.

Sea: W_i = Frecuencia inicial

W_f = Frecuencia final

δW = Variación de frecuencia

N = Número de frecuencias = $\frac{W_f - W_i}{\delta W} + 1$

X = Deflexión en la base

para : $W_1 = W_i$, $X = X_1$: Pto. (W_1, X_1)

$W_2 = W_1 + \delta W$, $X = X_2$: Pto. (W_2, X_2)

$W_3 = W_2 + \delta W$, $X = X_3$: Pto. (W_3, X_3)

• • •
• • •
• • •

$W_n = W_{n-1} + \delta W$, $X = X_n$: Pto. (W_n, X_n)

Una vez conocidas las frecuencias naturales de la chimenea, podemos retornar a las ecuaciones anteriores y calcular las deflexiones para cada una de ellas.

Por tratarse de deflexiones relativas ($X_1=1$), los resultados obtenidos estarían conformando los desplazamientos correspondientes a cada modo de vibración de la estructura, denominados vectores modales.

0 sea:

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{21} \\ X_{31} \end{bmatrix} \quad \phi_2 = \begin{bmatrix} X_{12} \\ X_{22} \\ X_{32} \end{bmatrix} \quad , \quad \phi_3 = \begin{bmatrix} X_{13} \\ X_{23} \\ X_{33} \end{bmatrix}$$

$W = W_1$ $W = W_2$ $W = W_3$

donde:

ϕ_j = Vector modal "j".

X_{ij} = Deflexión o desplazamiento de la sección "i" (normalizado respecto a la sección $i = 1$) en el modo "j" de vibración.

W_j = Frecuencia natural de vibración del modo "j".

j = Número de modos del sistema = Número de masas consideradas.

i = Número de secciones del sistema = $j+1$.

1.3.4 Método Matricial

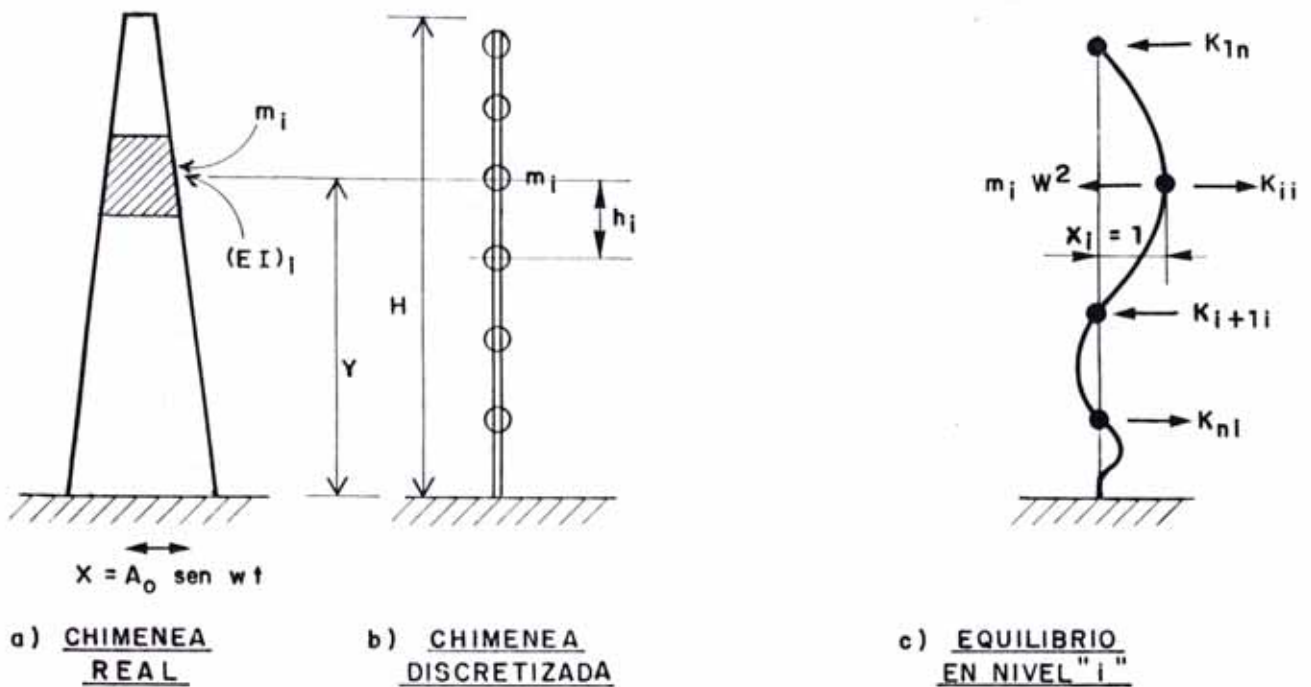
El planteo del problema de flexión de chimeneas en forma matricial constituye en esencia un método práctico de resolver el problema de los modos de vibración y frecuencias naturales que tendría el sistema en forma aproximada. (6)

Se ha visto que para el cálculo de las frecuencias y de los modos propios de oscilación se pueden desprestigiar las influencias del amortiguamiento, ya que, tal como se ha demostrado, puede desprestigiar μ^2 en relación con la unidad. (5)

El método consiste en reducir el sistema de infinitos grados de libertad mostrado en la figura 13a a un número finito de ellos, tal como se muestra en la figura 13b.

Se considera a la chimenea dividida en "n" tramos con las fuerzas directamente aplicadas y las de inercia de cada tramo, concentradas en sus centros de gravedad, denominados también como puntos característicos (12).

El sistema de ecuaciones canónicas, que caracteriza el movimiento de las estructuras puede obtenerse aplicando los métodos estáticos adoptados al cálculo dinámico, el principio de D'Alembert, las ecuaciones de Lagrange o el principio del trabajo virtual.



Ecuación de movimiento libre $\underline{\underline{m}} \ddot{\underline{\underline{x}}} + \underline{\underline{K}} \underline{\underline{x}} = 0$ (a)

Para movimiento armónico $\underline{\underline{x}} = A_0 \text{ sen } w t$ (b)

Se tiene $(\underline{\underline{K}} - w^2 \underline{\underline{m}}) \underline{\underline{x}} = 0$ (c)

Resolviendo $\underline{\underline{K}} - w^2 \underline{\underline{m}} = 0 \longrightarrow w$ (d)

Reemplazando (d) en (c) $\longrightarrow \underline{\underline{x}}$

Los desplazamientos modalizados : $(\phi_i)_n = \frac{(x_i)_n}{(x_{\text{máx}})_n}$

FIG. 13 SECUENCIA DE ANALISIS DE LA CHIMENEA SEGUN EL METODO MATRICIAL

Para aplicar el método estático a la chimenea idealizada, se escribe, según la dirección de cada grado de libertad, una ecuación de equilibrio dinámico (método de las deformaciones) tal como se muestra en la figura 13c.

En la chimenea idealizada de la figura 13, a cada masa le corresponde un grado de libertad.

Para determinar el sistema de ecuaciones canónicas que expresan el equilibrio dinámico general del sistema oscilante, se introducen las siguientes notaciones:

K_{ij} = Reacción dinámica que se origina en el nudo i , cuando al nudo j se le impulsa con una fuerza que da lugar a un desplazamiento unitario (ver figura 13c), mientras que los restantes nudos del sistema quedan bloqueados

K_{jj} = Reacción dinámica que se origina en el nudo j , cuando este ha sufrido un desplazamiento unitario y los restantes nudos del sistema permanecen bloqueados

M_j = Masa concentrada en el punto j

ω = Frecuencia propia de oscilación de la chimenea

$X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$ = Desplazamiento en la dirección de las oscilaciones que representan las incógnitas del movimiento. Estos desplazamientos se toman en su amplitud máxima.

Con el método de las deformaciones se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones canónicas, que expresan el equilibrio dinámico :

$$\begin{aligned}
 (K_{11} - M_1 \cdot \omega^2) \cdot X_1 + K_{12} \cdot X_2 + \dots + K_{1j} \cdot X_j + \dots + K_{1n} \cdot X_n &= 0 \\
 K_{21} \cdot X_1 + (K_{22} - M_2 \cdot \omega^2) \cdot X_2 + \dots + K_{2j} \cdot X_j + \dots + K_{2n} \cdot X_n &= 0 \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 K_{j1} \cdot X_1 + K_{j2} \cdot X_2 + \dots + (K_{jj} - M_j \cdot \omega^2) \cdot X_j + \dots + K_{jn} \cdot X_n &= 0 \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 \vdots & \\
 K_{n1} \cdot X_1 + K_{n2} \cdot X_2 + \dots + K_{nj} \cdot X_j + \dots + (K_{nn} - M_n \cdot \omega^2) \cdot X_n &= 0
 \end{aligned}
 \dots (1)$$

Este sistema de ecuaciones resulta de ordenar un sistema de base obtenido tras la introducción de unos nudos (péndulos) suplementarios en la dirección de los grados de libertad, e igual número de masas n , según la figura 13c.

Como incógnitas ($X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$) se consideran a los desplazamientos en la dirección de las oscilaciones. Para el sistema de la figura 13b, los desplazamientos se producen sobre la horizontal y los coeficientes K_{ij} y K_{jj} se calculan en función de las características elásticas y geométricas de la estructura.

Las ecuaciones (1) pueden expresarse en forma matricial como:

$$([K] - \omega^2 \cdot [M]) \cdot \{X\} = \{0\} \quad \dots (2)$$

resultando la expresión 2, una ecuación lineal y homogénea.

Donde:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1j} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2j} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{j1} & K_{j2} & \dots & K_{jj} & \dots & K_{jn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nj} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

es la matriz simétrica de las rigideces ($K_{ij} = K_{ji}$).

Cabe señalar, que la obtención de ésta matriz para un caso particular de estructura continua tipo chimenea, no fue directa tal como resulta en edificaciones. Esta matriz se obtuvo, invirtiendo su respectiva matriz de flexibilidad, la que fue calculada empleando el método de la Viga Conjugada (Ver anexo B). Además:

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & M_j & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & M_n \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

es la matriz diagonal de Masas.

Y :

$$\{X\} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_j \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

es la matriz columna o vertical de los desplazamientos horizontales.

Para que el sistema de ecuaciones (1) tenga soluciones diferentes de $X_1 = 0, X_2 = 0, \dots, X_j = 0, \dots, X_n = 0$ (condición necesaria para que oscile el sistema y salga del estado de reposo), el determinante del sistema de ecuaciones (1) o de la ecuación (2) tiene que ser igual a cero, luego:

$$\Delta(W) = \begin{vmatrix} K_{11} - M_1 \cdot W^2 & K_{12} & \dots & K_{1j} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} - M_2 \cdot W^2 & \dots & K_{2j} & \dots & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\ K_{j1} & K_{j2} & \dots & K_{jj} - M_j \cdot W^2 & \dots & K_{jn} \\ \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nj} & \dots & K_{nn} - M_n \cdot W^2 \end{vmatrix} = 0 \quad \dots (6)$$

$$\Delta(\omega) = | [K] - \omega^2 \cdot [M] | = 0 \quad \dots (7)$$

De las expresiones (6) o (7) se obtiene una ecuación de grado "n", en donde sus raíces son los cuadrados de las frecuencias propias de oscilación (ω^2). Estas raíces son siempre reales y positivas.

A cualquiera de las expresiones anteriores se les denomina "Ecuación Característica del Sistema Oscilante".

La resolución de esta ecuación característica, se obtiene aplicando el Método de Iteración Matricial desarrollado por Jacobi (13).

A la Ley de variación de las amplitudes de las oscilaciones propias, $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$, correspondientes a cada frecuencia propia en ω_i , se le conocen como modos propios de oscilación del sistema.

Por consiguiente, el número de modos es igual al número de los grados de libertad dinámica que se consideren en el análisis de cualquier chimenea.

1.4 DETERMINACION DEL METODO A UTILIZAR

En el acápite 1.3 explicamos en lo que consiste cada uno de los tres métodos de análisis que escogimos para llevar a cabo ésta investigación.

De los métodos estudiados, se puede desprender las siguientes observaciones.:

- 1) El Método de los elementos continuos, conocido también como el "Método Exacto", fue empleado para analizar una chimenea de sección transversal uniforme.

Esta particularidad se debe a los inconvenientes que se presentan en la solución de la ecuación diferencial, para el caso en que la sección transversal sea variable.

La variación que existe en el área y en el momento de inercia de dicha sección no permiten encontrar expresiones matemáticas que calculen las frecuencias naturales de vibración y sus respectivas formas de modo, de manera exacta tal como se obtuvo con la sección uniforme.

- 2) Los Métodos de Myklestad y Matricial, conocidos también como "Métodos Aproximados", por basarse íntegramente su desarrollo en procesos iterativos, fueron empleados para analizar cualquier tipo de chimenea, idealizándola como un sistema de masas concentradas. (ver figura 2)

Por lo tanto, de las observaciones señaladas podemos concluir que la manera de poder comparar las ventajas que cada método posee, sería analizando una chimenea de sección transversal uniforme.

Pretendemos con esta comparación, encontrar aquel método aproximado que logre tener mayor afinidad con el método exacto.

Esta afinidad estará básicamente determinada al comparar los valores que se tengan en las frecuencias circulares, cortantes y momentos, que cada uno de ellos calcule.

1.4.1 Caso Particular:

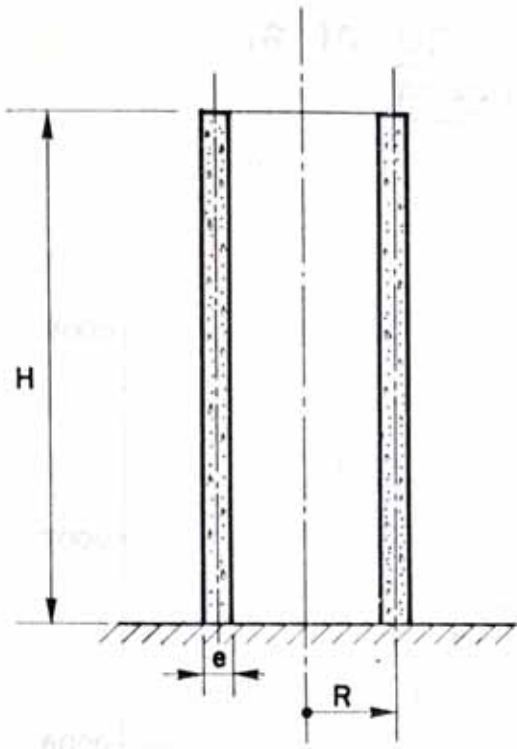
En la figura 14a, se muestra una chimenea particular de sección transversal uniforme acompañada de sus respectivas características físicas y geométricas.

Para el cálculo de las respuestas debido al sismo, seguimos las recomendaciones del Reglamento Nacional de Construcciones (17), de donde se obtuvo los factores sísmicos necesarios para calcularlos (ver figura 14a).

1.4.2 Gráfico Comparativo de Frecuencias de Vibración

En la figura 15, podemos apreciar una curva continua por cada método de análisis, en un gráfico comparativo de Frecuencias circulares vs. su modo de vibración respectivo.

Para poder efectuar la comparación gráfica, fue necesario tomar para el método de los elementos

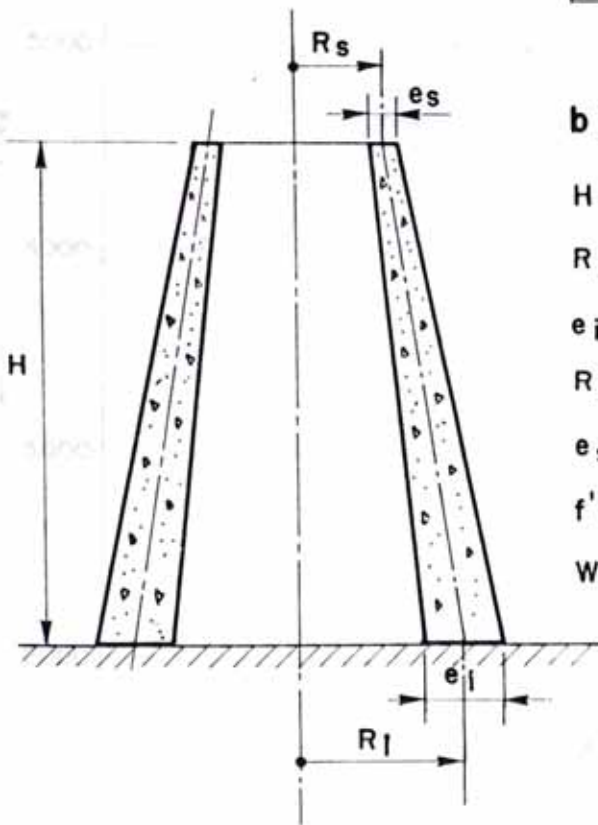


a).- CHIMENEA DE SECCION UNIFORME

$H = 50 \text{ m.}$ $Z = 1.0$
 $R = 2.3335 \text{ m.}$ $U = 1.3$
 $e = 0.333 \text{ m.}$ $S = 1.0 \rightarrow T_s = 0.3 \text{ seg.}$
 $f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ $R_d = 3.0$
 $W = 585.886 \text{ Kg. (Peso total)}$

FACTORES SISMICOS:

$Z =$ Factor de Zona.
 $U =$ Factor de Uso.
 $S =$ Factor Tipo de Suelo.
 $R_d =$ Factor de Ductilidad.
 $T_s =$ Período predominante del Terreno.

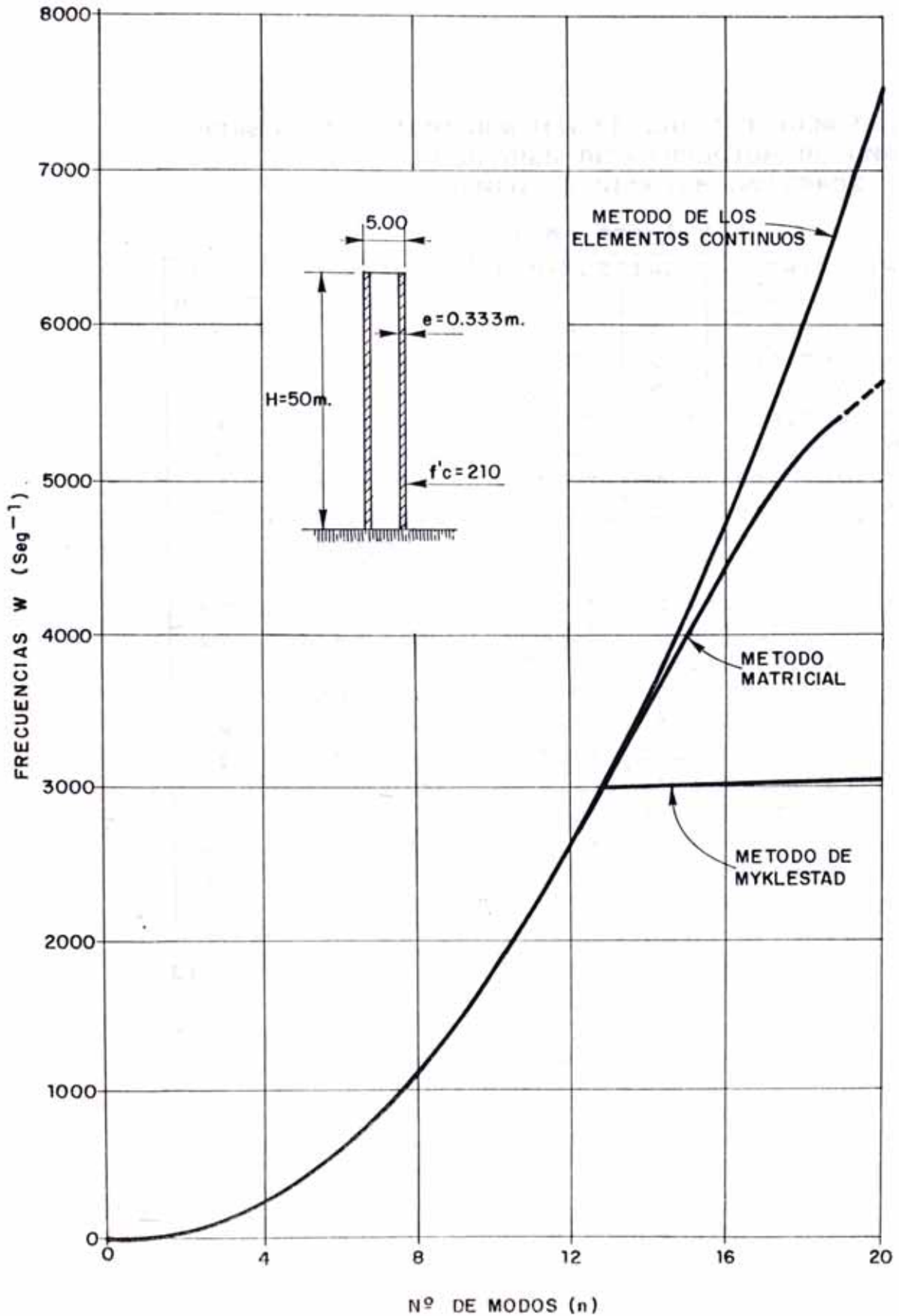


b).- CHIMENEA DE SECCION VARIABLE

$H = 76.2 \text{ m.}$ $Z = 1.0$
 $R_j = 1.525 \text{ m.}$ $U = 1.3$
 $e_j = 0.61 \text{ m.}$ $S = 1.0 \rightarrow T_s = 0.3 \text{ seg.}$
 $R_s = 0.7625 \text{ m.}$ $R_d = 3.0$
 $e_s = 0.1525 \text{ m.}$
 $f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$
 $W = 534.461 \text{ Kg. (Peso Total)}$

FIG. 14 CASOS PARTICULARES.

FIG. 15 GRAFICO COMPARATIVO DE FRECUENCIAS CIRCULARES DE VIBRACION



CUADRO 1 : COMPARACION DE LAS FRECUENCIAS CIRCULARES DE VIBRACION DE UNA CHIMENEA DE SECCION UNIFORME.

(en seg^{-1})

No. MODOS	M. CONTINUOS	M. MYKLESTAD		M. MATRICIAL	
	W	W	E (%)	W	E (%)
1	6.934	6.938	0.1	6.939	0.1
2	43.458	43.563	0.2	43.547	0.2
3	121.665	122.063	0.3	122.086	0.4
4	238.463	239.563	0.5	239.545	0.5
5	394.194	396.438	0.6	396.460	0.6
6	588.857	592.875	0.7	592.880	0.7
7	822.453	828.750	0.8	828.787	0.8
8	1094.982	1103.969	0.8	1103.986	0.8
9	1406.444	1417.938	0.8	1417.973	0.8
10	1756.838	1769.750	0.7	1769.714	0.7
11	2146.165	2157.250	0.5	2157.297	0.5
12	2574.424	2578.641	0.2	2577.396	0.1
13	3041.617	3013.500	0.9	3024.480	0.6
14	3547.742	3014.162	15.0	3489.713	1.6
15	4092.800	3015.813	26.3	3959.562	3.3
16	4676.885	3016.031	35.5	4414.304	5.6
17	5299.730	3018.250	43.1	4826.949	8.9
18	5961.588	3019.250	49.4	5163.622	13.4
19	6662.379	3023.555	54.6	5387.144	19.1
20	7402.102	3025.750	59.1	5600.100	24.3

$$\text{Error (\%)} = \left| 1 - \frac{\text{M.a.}}{\text{M.e.}} \right| \times 100$$

donde: m.a. = metodo aproximado

m.e. = metodo exacto (elementos continuos)

continuos 20 secciones en todo lo alto de la chimenea (considerando además la sección que se encuentra en la base).

De la misma manera, para ambos métodos aproximados, se realizó una partición de la estructura equivalente a 20 masas concentradas.

Es necesario aclarar, que las curvas que se muestran tienen solo la finalidad de ilustrar la tendencia que existen con las frecuencias circulares de cada uno de los métodos presentados, entendiéndose de esta manera que realmente la continuidad en cualquiera de ellas no existe, de la misma forma como no existe un modo de vibración que no sea entero.

Las frecuencias circulares graficadas, se encuentran tabuladas en el Cuadro 1, que se muestra a continuación.

Se puede notar, para cada método de análisis, las frecuencias circulares correspondientes a los 20 modos de vibración, además, se incluye en los métodos aproximados una columna donde se encuentran los errores que resultan de comparar las frecuencias aproximadas con las exactas.

Observando la figura 15, podemos apreciar que el método de Myklestad sufre un repentino

estancamiento a partir del modo 13, manteniéndose constante hasta el final (ver Cuadro 1).

Sin embargo, el método matricial posee una curva que es idéntica a la de Mykkestad y también a la exacta, en sus trece primeros modos, encontrándose que para modos superiores a éste, los resultados que otorga son muy cercanos al exacto (ver Cuadro 1).

De esta discusión, llegamos a concluir que el método aproximado de Mykkestad presenta inconvenientes de cálculo, quedando por lo tanto descartado de esta investigación, debido a que además de esto demanda su procesamiento un tiempo de cómputo bastante mayor que el requerido por el método matricial.

Por el contrario, escogemos el método matricial como el indicado para continuar con esta investigación. Esto se debe fundamentalmente a que las frecuencias circulares que presenta son idénticas a la exacta, salvo para modos superiores donde resultan diferentes.

Esta diferencia no debería preocuparnos ya que según la recomendación del R.N.C. (17), bastaría considerar todos los modos de vibración cuya influencia acumulada no sea mayor al 90%.

Lo que significaría que para un sistema con 20 modos de vibración igual al que tenemos en estudio, quedarnos con los 13 primeros modos serían suficientes para calcular las respuestas sísmicas actuantes en una chimenea.

En el Cuadro 1 notamos que para modos superiores a 15 encontramos errores mayores al 3.3% permisible (5), según esto nos bastaría con utilizar las 15 primeras frecuencias circulares de Vibración de la chimenea, de esta manera, estamos asegurando la recomendación que nos hace el R.N.C. y además, conseguimos que las frecuencias calculadas estén dentro del rango rango permisible indicado.

1.4.3 Gráfico Comparativo de Cortantes y Momentos

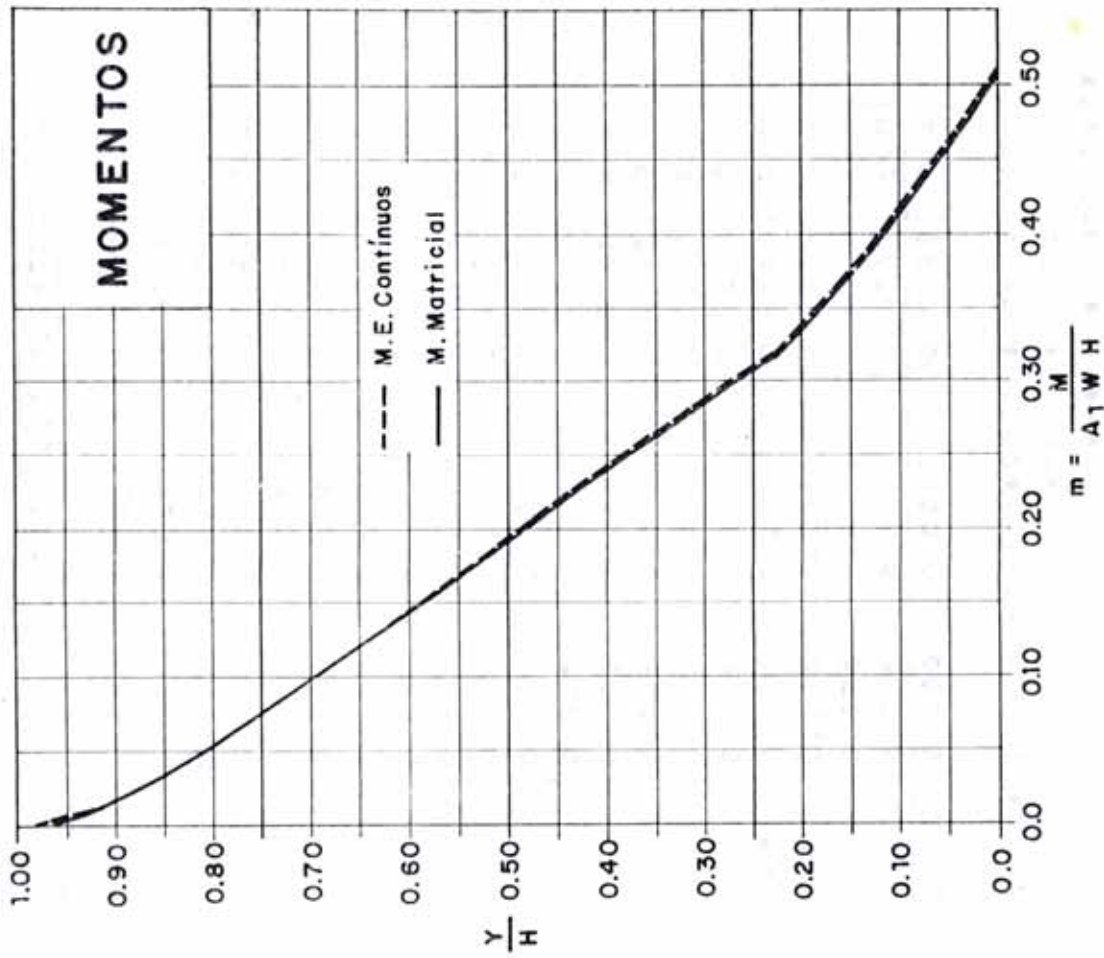
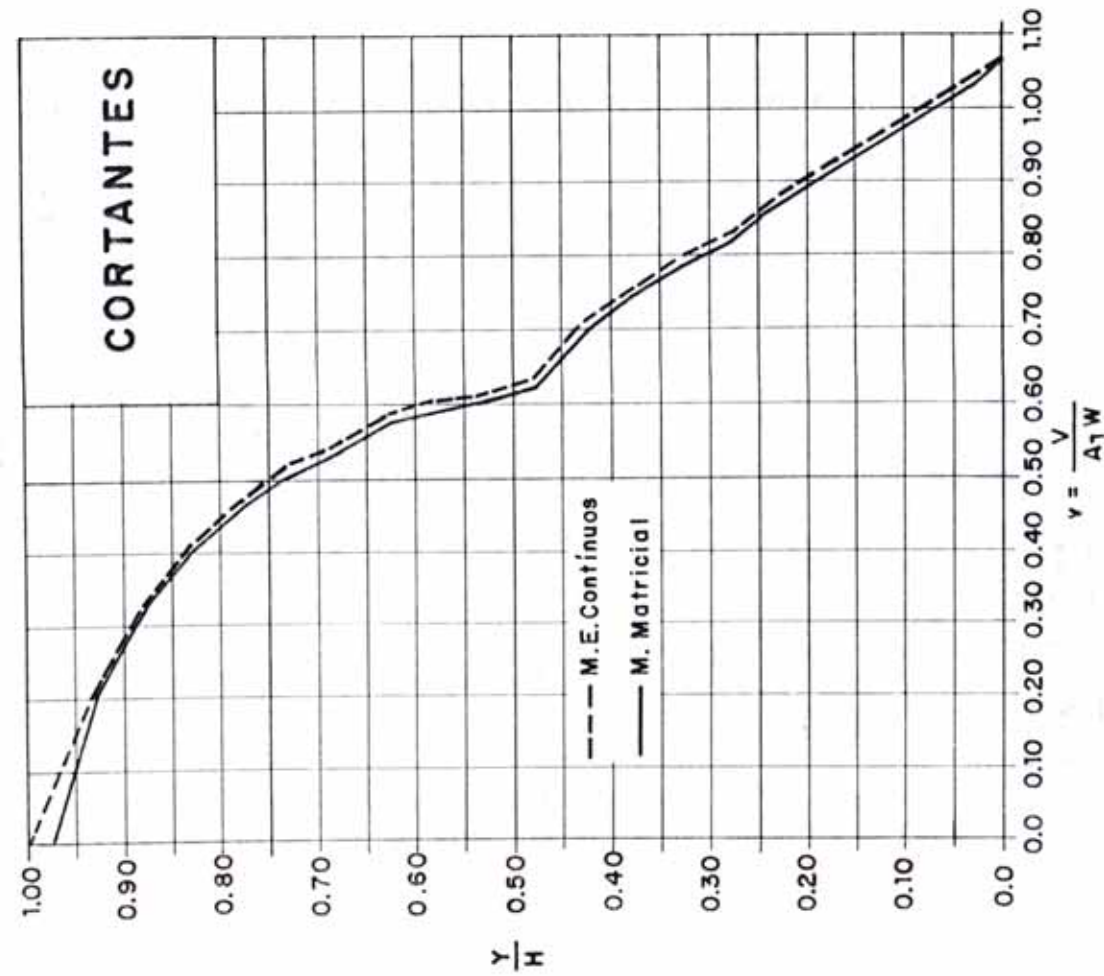
Habiendo sido elegido el método matricial como único método de análisis con el que continuaremos la investigación, mostramos en la figura 16 los gráficos comparativos de cortantes y momentos correspondientes al método de los elementos continuos y al método matricial para la chimenea de sección uniforme escogida (ver figura 14a).

Se consideró a la chimenea discretizada en 20 tramos, lo que representa para el método exacto, 21 secciones en todo lo alto de ella (incluyendo una sección en la base) y para el método

FIG.16 GRAFICOS COMPARATIVOS DE CORTANTES Y MOMENTOS

DE UNA CHIMENEA DE SECCION UNIFORME

a).- Se consideró 20 masas en los métodos aproximados.



CUADRO 2 : COMPARACION DE CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE UNA CHIMENEA DE SECCION UNIFORME

$$v = \frac{U}{A1.H}$$

NIVEL	Yes H	M. CONTINUOS		M. MATRICIAL		E(%)
		v	v	v	v	
1	0.975	0.0667	0.0000	0.0000	-	-
2	0.925	0.2267	0.2116	0.2116	6.7	6.7
3	0.875	0.3340	0.3265	0.3265	2.2	2.2
4	0.825	0.4194	0.4062	0.4062	3.2	3.2
5	0.775	0.4766	0.4629	0.4629	2.9	2.9
6	0.725	0.5258	0.5079	0.5079	3.4	3.4
7	0.675	0.5521	0.5359	0.5359	2.9	2.9
8	0.625	0.5896	0.5737	0.5737	2.7	2.7
9	0.575	0.6090	0.5919	0.5919	2.8	2.8
10	0.525	0.6184	0.6036	0.6036	2.4	2.4
11	0.475	0.6391	0.6239	0.6239	2.4	2.4
12	0.425	0.7130	0.6950	0.6950	2.5	2.5
13	0.375	0.7598	0.7432	0.7432	2.2	2.2
14	0.325	0.8029	0.7841	0.7841	2.3	2.3
15	0.275	0.8321	0.8161	0.8161	1.9	1.9
16	0.225	0.8827	0.8668	0.8668	2.3	2.3
17	0.175	0.9250	0.9074	0.9074	1.9	1.9
18	0.125	0.9630	0.9494	0.9494	1.4	1.4
19	0.075	1.0039	0.9900	0.9900	1.4	1.4
20	0.025	1.0459	1.0286	1.0286	1.6	1.6
BASE	0.000	1.0688	1.0647	1.0647	0.4	0.4

$$\text{Error } (\%) = \left| 1 - \frac{M.a.}{M.e.} \right| \times 100$$

$$M = \frac{M}{A1.H.H}$$

NIVEL	Yes H	M. CONTINUOS		M. MATRICIAL		E(%)
		M	M	M	M	
1	0.975	0.0033	0.0000	0.0000	-	-
2	0.925	0.0107	0.0106	0.0106	0.9	0.9
3	0.875	0.0259	0.0258	0.0258	0.4	0.4
4	0.825	0.0444	0.0443	0.0443	0.2	0.2
5	0.775	0.0650	0.0647	0.0647	0.5	0.5
6	0.725	0.0869	0.0863	0.0863	0.7	0.7
7	0.675	0.1095	0.1089	0.1089	0.6	0.6
8	0.625	0.1328	0.1317	0.1317	0.8	0.8
9	0.575	0.1564	0.1552	0.1552	0.8	0.8
10	0.525	0.1790	0.1777	0.1777	0.7	0.7
11	0.475	0.2031	0.2012	0.2012	0.9	0.9
12	0.425	0.2286	0.2264	0.2264	1.0	1.0
13	0.375	0.2526	0.2501	0.2501	1.0	1.0
14	0.325	0.2755	0.2735	0.2735	0.7	0.7
15	0.275	0.2986	0.2958	0.2958	0.9	0.9
16	0.225	0.3203	0.3174	0.3174	0.9	0.9
17	0.175	0.3555	0.3516	0.3516	1.1	1.1
18	0.125	0.3923	0.3890	0.3890	0.8	0.8
19	0.075	0.4362	0.4317	0.4317	1.0	1.0
20	0.025	0.4834	0.4787	0.4787	1.0	1.0
BASE	0.000	0.5078	0.5039	0.5039	0.8	0.8

donde : M.a. = metodo aproximado

M.e. = metodo exacto

(Elementos Continuos)

aproximado 20 masas concentradas.

El cálculo de los cortantes y momentos finales se obtuvo considerando una superposición modal según el promedio entre la suma absoluta y la media cuadrática de los cortantes y momentos correspondientes a cada uno de los 20 modos de vibración (17).

Lo cual significa que:

$$L = \frac{\sum L_n^2 + \sum |L_n|}{2}$$

donde:

L_n = Cortante (V_n) o Momento (M_n) correspondiente al modo "n" de vibración.

L = Cortante (V) o Momento (M) final correspondiente a la combinación de los 20 modos de vibración.

Con la finalidad de tener cortantes y momentos adimensionales en los gráficos, hemos dividido a cada uno de ellos por ciertos parámetros intrínsecos a la chimenea.

El cortante basal es el divisor de los cortantes y para los momentos el divisor resulta de multiplicar el basal por la altura, resultando por consiguiente:

$$\frac{V}{A1 \cdot W} = \text{Cortante adimensional (v)}$$

$$\frac{M}{A1 \cdot W \cdot H} = \text{Momento adimensional (m)}$$

W = Peso total de la chimenea

H = Altura de la chimenea

$$A1 = \frac{Z \cdot U \cdot S \cdot C1}{Rd}$$

$$C1 = \frac{0.80}{\frac{T1}{Ts} + 1} = \text{Coeficiente Sismico}$$

T1 = Periodo fundamental de vibración

Ts = Periodo predominante del suelo

Z, U, S, Rd = Factores sísmicos según el R.N.C.

Podemos apreciar en ambos gráficos la gran aproximación que existe en las curvas, llegándose a confundir las que corresponden a los momentos flectores.

En el Cuadro 2 se tiene tabulados los correspondientes valores de cortantes y momentos finales que fueron graficados en la figura 16.

Los errores que cometemos al considerar los resultados que otorga el método matricial en comparación con el método exacto son, para las fuerzas cortantes iguales a 2.5% (en niveles cercanos a la base) y para los momentos flectores iguales a 1.1%, encontrándose en la base errores iguales a 0.4% y 0.8% para cada uno de ellos.

De esta observación podemos señalar que, las respuestas sísmicas calculadas por el método matricial podrán ser consideradas como exactas, debido a que los errores encontrados, principalmente los que corresponden a los momentos flectores son menores al 1.1%, valor que desde el punto de vista ingenieril es totalmente despreciable.

Hacemos hincapié en que la principal zona de la chimenea que debe merecer toda nuestra atención se encuentra ubicada en la base, bastando con solo asegurar que los cortantes y momentos alrededor de ella cumplan con las exigencias permitidas, tal como lo podemos comprobar en el Cuadro 2.

Esta consideración de adimensionar los Cortantes y Momentos, será empleado en adelante para el desarrollo de la presente investigación.

1.4.4 Conclusión

Luego de comparar los resultados calculados por cada uno de los métodos, como son las frecuencias circulares, los cortantes y los momentos, encontrados en la chimenea particular de sección transversal uniforme y habiéndose verificado que los errores cometidos se encuentran dentro del rango permisible y muy por debajo del máximo,

escogemos al método matricial como el método aproximado indicado para continuar con el desarrollo de la investigación, debido que satisface las exigencias del método exacto y además porque con él podremos analizar cualquier tipo de chimenea de sección transversal variable.

1.5 Determinación del Número de Masas a Utilizar

Para realizar la comparación de los métodos aproximados con el método exacto, fue necesario particionar a la chimenea y discretizarla como un sistema de masas concentradas.

El número de masas que consideramos fue igual a 20, y se comprobó que tomando esa cantidad el sistema discretizado llega a tener igual comportamiento que el sistema de masa continua.

De esta manera, en un sentido estrictamente riguroso, tomar un total de 20 masas concentradas equivale a decir que es la suficiente para considerar los resultados obtenidos como exactos.

1.5.1 Casos Particulares

Para la determinación del número de masas a utilizar en el análisis dinámico, se tuvo en cuenta dos casos particulares de chimeneas, como son las que se muestran en la figura 14.

Consideraremos para cada caso una variación en el número de masas discretizadas, estando estos conformados por 3, 5, 10, 15 y 20 particiones.

Tendremos, por tanto que efectuar el análisis dinámico de un total de 10 chimeneas y realizar una comparación de los resultados que se obtengan tanto para cortantes como para los momentos adimensionales de cada uno de ellos con los correspondientes valores exactos, que como sabemos equivalen a los encontrados empleando el total de 20 masas concentradas.

1.5.2 Gráfico Comparativo de Cortantes y Momentos

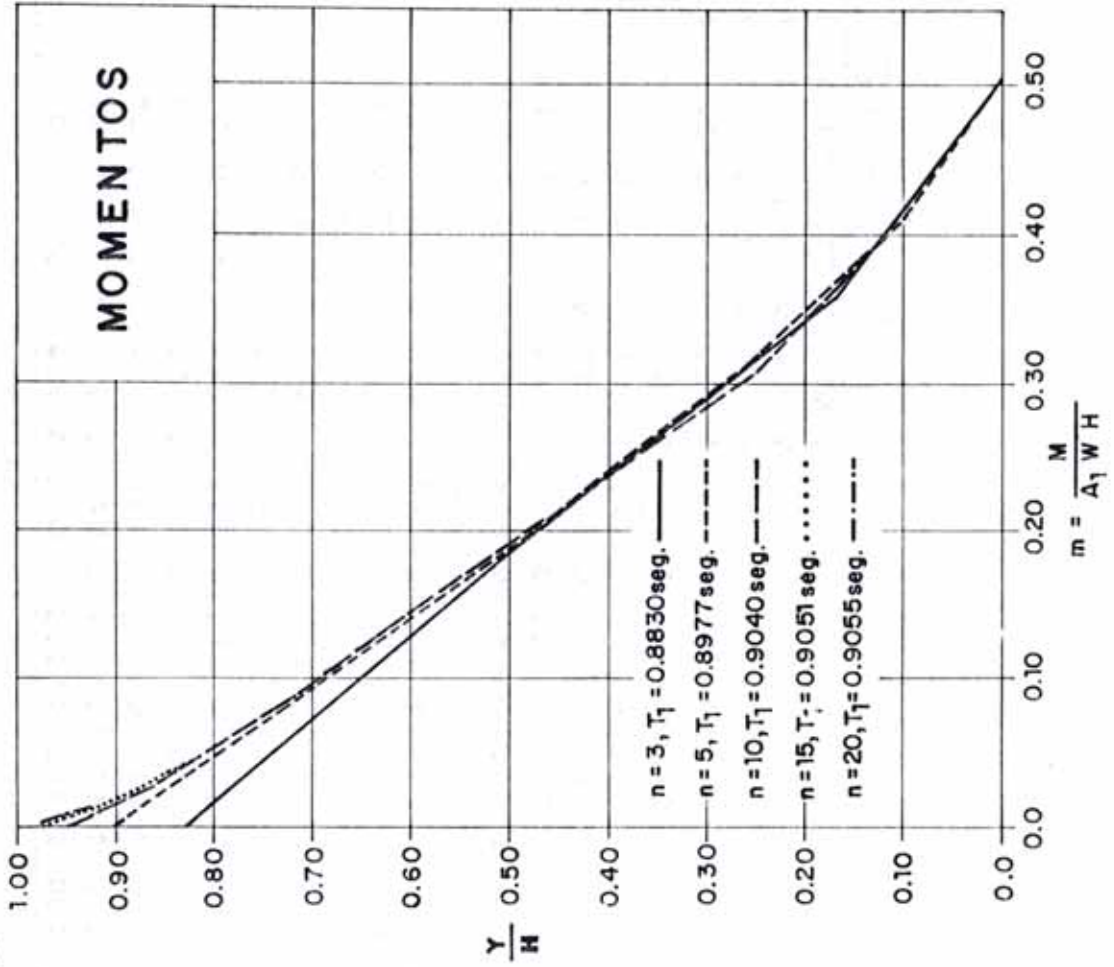
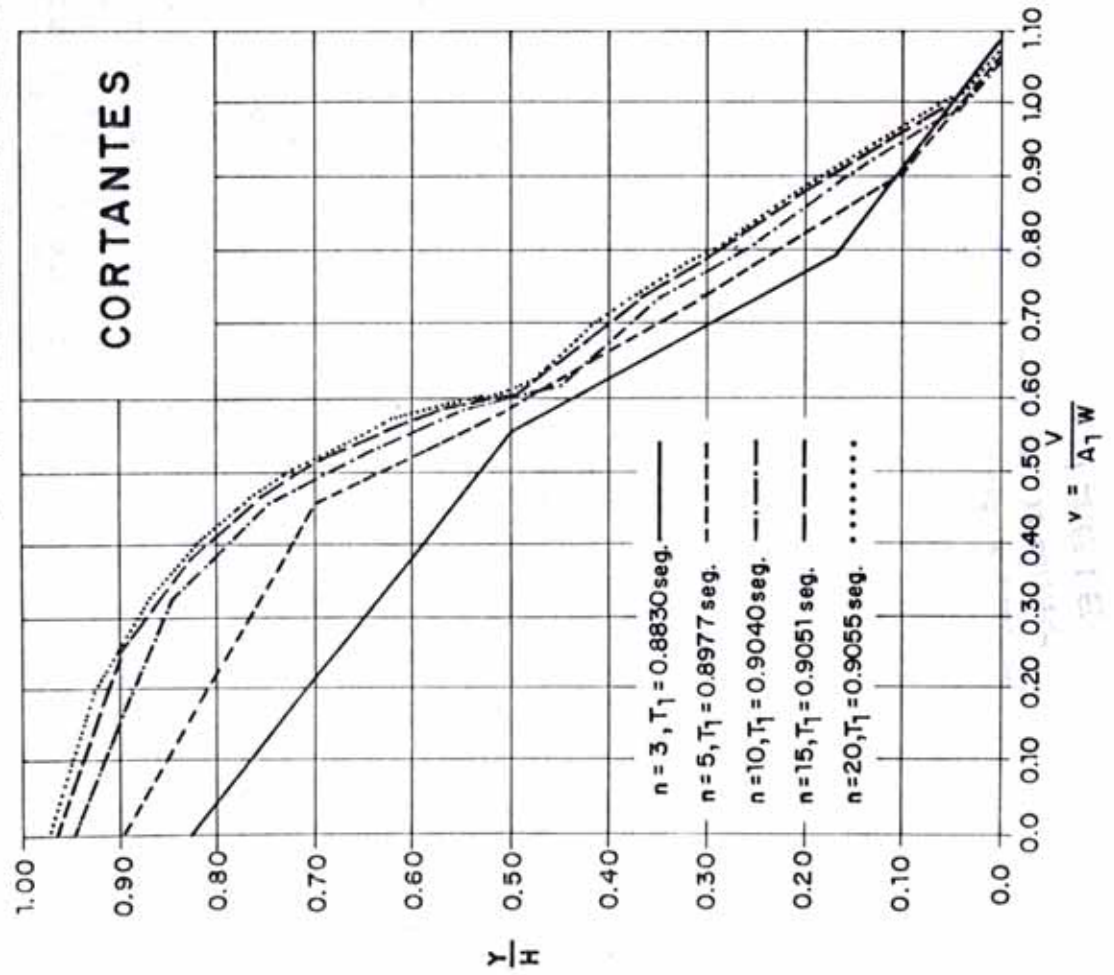
En las figuras 17 y 18, se muestran los gráficos adimensionales de cortantes y momentos para los dos casos particulares de chimeneas estudiadas.

Se puede apreciar en cada gráfico la presencia de cinco curvas en distinto tipo de trazo; la leyenda indica el número de masas consideradas, el periodo del primer modo de vibración y el correspondiente trazo que la representa.

Es evidente que se obtiene mejor aproximación del periodo de vibración, cuanto mayor sea el número de masas que empleamos para representar el sistema.

FIG.17 DETERMINACION DEL NUMERO DE MASAS A DISCRETIZAR: CHIMENEA DE SECCION UNIFORME

- 1.- El método utilizado es el matricial.
- 2.- El número de combinaciones de modos es igual al número de masas consideradas.
- 3.- "n" es igual al número de masas del sistema.



CUADRO 3 : COMPARACION DE LOS CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE UNA CHIMENEA DE SECCION UNIFORME DETERMINACION DEL NUMERO DE MASAS A DISCRETIZAR

3 Masas			5 Masas			10 Masas			15 Masas			20 Masas			NIVEL
$\frac{V_{cg}}{H}$	U	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	U	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	U	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	U	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	U	M	
0.033	0.000	0.000	0.900	0.000	0.000	0.950	0.000	0.000	0.967	0.000	0.000	0.975	0.000	0.000	1
0.500	0.557	0.106	0.700	0.461	0.092	0.950	0.326	0.033	0.900	0.255	0.017	0.925	0.212	0.011	2
0.167	0.796	0.358	0.500	0.597	0.108	0.750	0.460	0.074	0.833	0.381	0.041	0.975	0.927	0.026	3
BASE	1.009	0.503	0.300	0.738	0.287	0.650	0.530	0.119	0.767	0.462	0.060	0.825	0.406	0.044	4
			0.100	0.910	0.410	0.550	0.597	0.166	0.700	0.516	0.097	0.775	0.469	0.065	5
			BASE	1.072	0.503	0.450	0.620	0.214	0.600	0.559	0.128	0.725	0.500	0.086	6
						0.350	0.739	0.262	0.567	0.590	0.159	0.675	0.536	0.109	7
						0.250	0.912	0.307	0.500	0.602	0.189	0.625	0.574	0.132	8
						0.150	0.908	0.370	0.433	0.674	0.222	0.575	0.592	0.155	9
						0.050	0.991	0.455	0.367	0.741	0.254	0.525	0.604	0.178	10
			BASE	1.066	0.504	BASE	1.066	0.504	0.300	0.793	0.285	0.475	0.624	0.201	11
									0.233	0.849	0.314	0.425	0.695	0.226	12
									0.167	0.907	0.358	0.375	0.743	0.250	13
									0.100	0.960	0.410	0.325	0.784	0.274	14
									0.033	1.016	0.471	0.275	0.816	0.296	15
									BASE	1.065	0.504	0.225	0.867	0.317	16
												0.175	0.907	0.352	17
												0.125	0.949	0.389	18
												0.075	0.990	0.432	19
												0.025	1.029	0.479	20
												BASE	1.065	0.504	

donde : $U = \frac{V}{A1.W}$

$M = \frac{M}{A1.W.H}$

CUADRO 4 : DETERMINACION DEL NUMERO DE MASAS A DISCRETIZAR

$\frac{V_{0.05}}{H}$	3 Masas		5 Masas		10 Masas		15 Masas		20 Masas	
	v	E (%)	v	E (%)	v	E (%)	v	E (%)	v	E (%)
0.60	0.051	66.9	0.231	46.9	0.393	9.7	0.421	9.2	0.435	
0.60	0.389	33.3	0.524	10.1	0.558	4.3	0.574	1.5	0.583	
0.40	0.630	12.4	0.663	7.8	0.679	5.6	0.708	1.5	0.719	
0.20	0.773	12.6	0.824	7.1	0.860	3.0	0.878	1.0	0.887	
BASE	1.089	2.3	1.072	0.7	1.066	0.1	1.065	0.00	1.065	
Periodo	3 Masas		5 Masas		10 Masas		15 Masas		20 Masas	
T_1 (seg)	0.8830	2.48	0.8977	0.86	0.9040	0.17	0.9051	0.04	0.9055	
$\frac{V_{0.05}}{H}$	3 Masas		5 Masas		10 Masas		15 Masas		20 Masas	
	M	E (%)	M	E (%)	M	E (%)	M	E (%)	M	
0.60	0.017	69.1	0.046	16.4	0.053	3.6	0.054	1.8	0.055	
0.60	0.128	11.1	0.140	2.9	0.143	0.7	0.143	0.7	0.144	
0.40	0.237	0.4	0.237	0.4	0.238	0.0	0.238	0.0	0.238	
0.20	0.341	1.5	0.348	3.9	0.339	1.2	0.336	0.3	0.335	
BASE	0.503	0.2	0.503	0.2	0.504	0.2	0.504	0.0	0.504	

donde:

E = Error porcentual
 R_n = Cortante adimensional (v), Momento adimensional (m) o Primer periodo de vibracion (T₁) correspondiente a "n" masas concentradas
 R_{20} = Cortante adimensional (v), Momento adimensional (m) o Primer periodo de vibracion (T₁) correspondiente a 20 masas concentradas

$$E(\%) = \left| 1 - \frac{R_n}{R_{20}} \right| \times 100$$

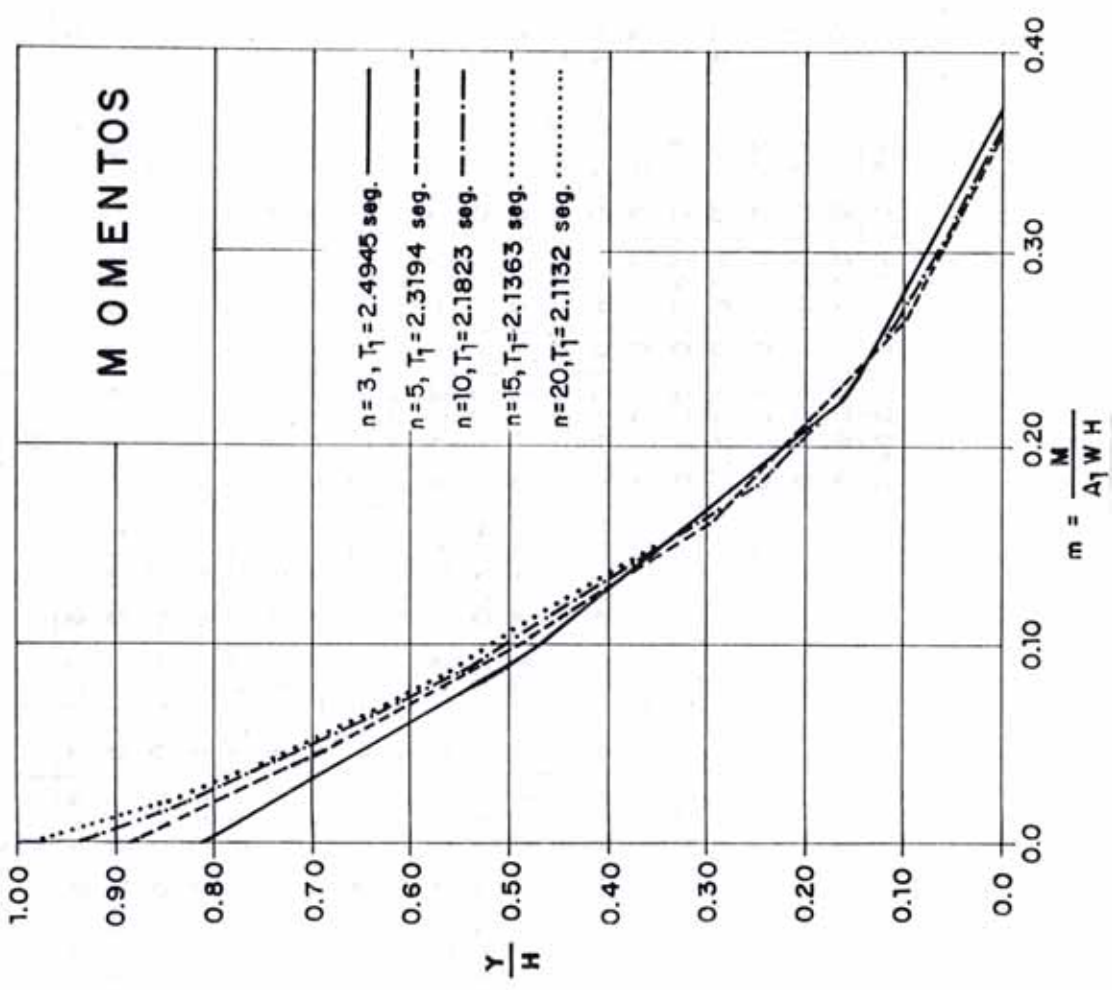
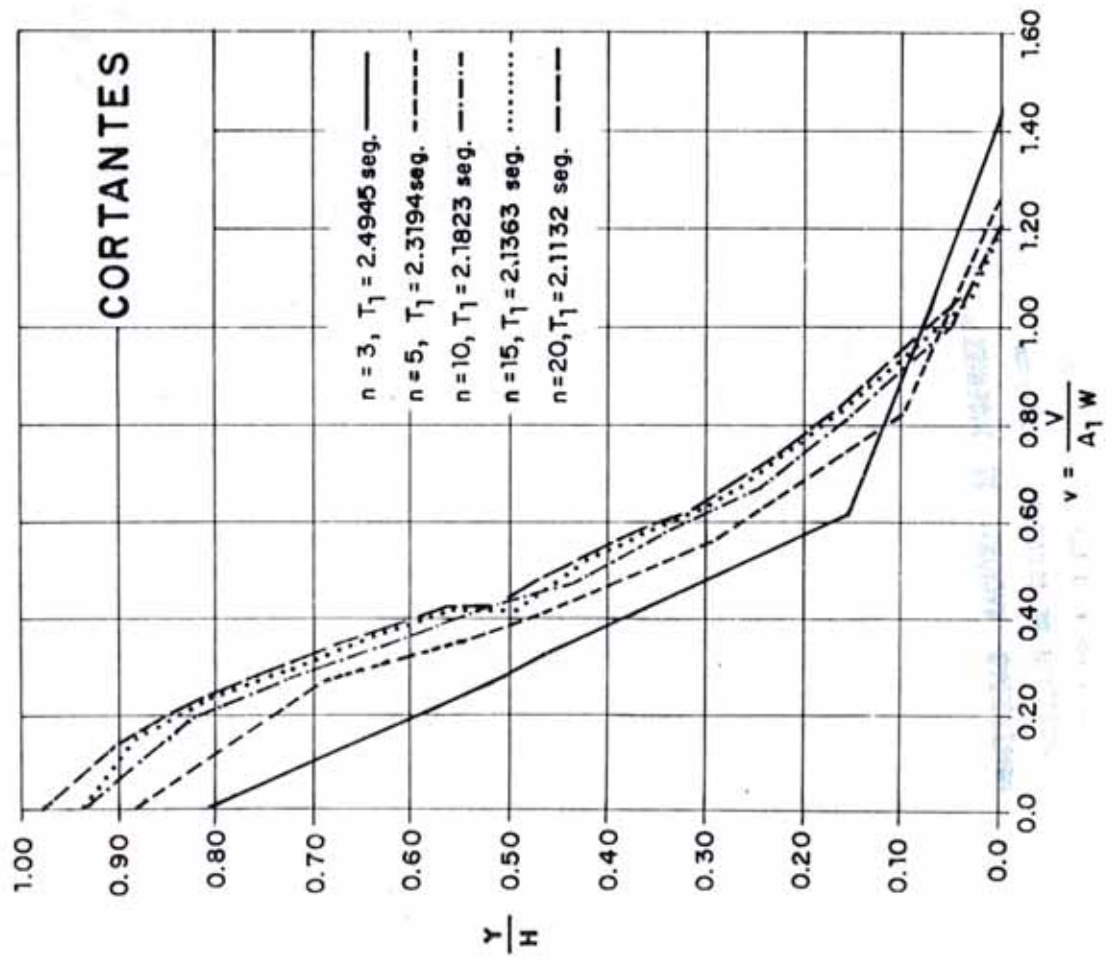
$$v = \frac{V}{A1.W}$$

$$m = \frac{M}{A1.W.H}$$

FIG.18 DETERMINACION DEL NUMERO DE MASAS A DISCRETIZAR:

INTERACCION DE LOS MODOS EN UNA CHIMENEA DE SECCION VARIABLE

- 1.- El método utilizado es el matricial.
- 2.- El número de combinaciones de modos es igual al número de masas consideradas.
- 3.- "n" es igual al número de masas del sistema.



CUADRO 5 : DETERMINACION DEL NUMERO DE MASAS A DISTANCIA 126K
 CUADRO 5 : COMPARACION DE LOS CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE UNA CHIMENEA DE SECCION VARIABLE

3 Masas			5 Masas			10 Masas			15 Masas			20 Masas			NIVEL
$\frac{V_{cg}}{H}$	V	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	V	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	V	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	V	M	$\frac{V_{cg}}{H}$	V	M	
0.807	0.000	0.000	0.889	0.000	0.000	0.947	0.000	0.000	0.965	0.000	0.000	0.974	0.000	0.000	
0.463	0.304	0.099	0.692	0.262	0.052	0.648	0.200	0.020	0.899	0.162	0.011	0.924	0.137	0.007	
0.154	0.596	0.232	0.494	0.395	0.105	0.748	0.276	0.042	0.892	0.234	0.024	0.874	0.203	0.016	
BASE	1.427	0.374	0.295	0.560	0.167	0.648	0.343	0.066	0.766	0.292	0.038	0.824	0.248	0.026	
			0.096	0.325	0.274	0.548	0.419	0.090	0.699	0.323	0.054	0.774	0.286	0.037	
			BASE	1.275	0.365	0.449	0.485	0.123	0.633	0.380	0.070	0.724	0.320	0.048	
						0.349	0.581	0.152	0.566	0.423	0.086	0.675	0.356	0.060	
						0.249	0.681	0.186	0.499	0.436	0.107	0.625	0.392	0.073	
						0.149	0.826	0.238	0.433	0.527	0.127	0.575	0.428	0.085	
						0.049	1.009	0.314	0.366	0.590	0.146	0.525	0.430	0.099	
						BASE	1.208	0.365	0.299	0.642	0.164	0.475	0.495	0.116	
									0.299	0.731	0.192	0.425	0.549	0.130	
									0.166	0.800	0.224	0.375	0.594	0.145	
									0.100	0.948	0.270	0.325	0.625	0.159	
									0.033	1.071	0.328	0.275	0.695	0.173	
									BASE	1.197	0.369	0.225	0.755	0.198	
												0.175	0.834	0.222	
												0.125	0.920	0.254	
												0.075	1.010	0.292	
												0.025	1.102	0.339	
												BASE	1.194	0.366	

donde : $V = \frac{U}{H \cdot H}$

$M = \frac{M}{H \cdot H \cdot H}$

CUADRO 6 : DETERMINACION DEL NUMERO DE MASAS A DISCRETIZAR

$\frac{Y_{0g}}{H}$	3 Masas		5 Masas		10 Masas		15 Masas		20 Masas	
	U	E (%)	U	E (%)	U	E (%)	U	E (%)	U	E (%)
0.80	0.007	97.4	0.110	55.0	0.236	11.6	0.258	9.4	0.267	
0.60	0.194	52.7	0.324	21.0	0.379	7.6	0.402	2.0	0.410	
0.40	0.378	33.9	0.473	17.3	0.532	7.0	0.559	2.3	0.572	
0.20	0.555	30.2	0.607	13.6	0.752	5.4	0.781	1.8	0.795	
BASE	1.427	19.5	1.275	6.8	1.208	1.2	1.197	0.3	1.194	
Periodo T ₁ (seg)	3 Masas		5 Masas		10 Masas		15 Masas		20 Masas	
	2.4945	18.04	2.3194	9.76	2.1823	3.27	2.1363	1.09	2.1132	
$\frac{Y_{0g}}{H}$	3 Masas		5 Masas		10 Masas		15 Masas		20 Masas	
	M	E (%)	M	E (%)	M	E (%)	M	E (%)	M	E (%)
0.80	0.002	93.8	0.023	28.1	0.031	3.1	0.031	3.1	0.032	
0.60	0.063	20.3	0.077	2.5	0.078	1.3	0.078	1.3	0.079	
0.40	0.133	3.6	0.134	2.9	0.137	0.7	0.138	0.0	0.138	
0.20	0.221	5.2	0.216	3.8	0.212	1.0	0.238	1.0	0.210	
BASE	0.374	2.2	0.365	0.3	0.365	0.3	0.363	0.8	0.366	

donde:

E = Error porcentual
 R_n = Cortante adimensional (U), Momento adimensional (M) o Primer periodo de vibracion (T₁) correspondiente a "n" Masas concentradas
 R₂₀ = Cortante adimensional (U), Momento adimensional (M) o Primer periodo de vibracion (T₁) correspondiente a 20 Masas concentradas

$$E(\%) = \left| 1 - \frac{R_n}{R_{20}} \right| \times 100$$

$$U = \frac{U}{A1.U}$$

$$M = \frac{M}{A1.M.H}$$

Con la finalidad de poder comparar los resultados calculados, se acompaña a cada figura dos cuadros donde se encuentran tabulados los cortantes y momentos adimensionales que fueron graficados (ver Cuadros 3 y 5)

Podemos notar como a medida que incrementamos el número de masas concentradas en cada chimenea, los cortantes y momentos adimensionales adquieren valores cada vez más aproximados.

De los gráficos, se puede deducir la rapidez de convergencia que poseen los momentos, ya que con solo tomar unas cuantas masas concentradas obtenemos resultados cercanos al exacto.

Para el caso de los cortantes, esta rapidez no se pone de manifiesto, pero la convergencia se consigue, como veremos más adelante.

Es necesario aclarar que los resultados calculados se encuentran actuando en el centro de gravedad de cada masa concentrada (ver 1.3.3 y 1.3.4) y que por lo tanto, la ordenada a la que hacemos referencia en los gráficos es la relación que existe entre la altura a la que se encuentra ubicada el centro de gravedad de cada masa medida desde la base y la altura total de la chimenea.

En los Cuadros 4 y 6, se encuentran tabulados los cortantes y momentos adimensionales con los periodos del primer modo de vibración de cada caso particular.

En ellos hacemos la comparación de los resultados obtenidos en cada variación con los correspondientes a los resultados exactos, que son los que pertenecen al sistema con 20 masas concentradas.

Podemos apreciar que si consideramos al sistema discretizado con solo 10 masas concentradas, encontramos muy buenos resultados en ambos casos particulares, siendo los errores máximos encontrados en la base para las fuerzas cortantes y momentos flectores adimensionales iguales a 1.2% y 0.3%, resultando prácticamente despreciables.

En zonas cercanas a la base, podemos apreciar que los errores encontrados no rebasan el valor permisible considerado para las respuestas igual al 10%, además habiendo fijado para el periodo de vibración un valor admisible igual al 5%, comprobamos que el error del 3.7% que cometemos está dentro del rango.

1.5.3 Conclusión

De esta manera, habiendo comprobado que los resultados mostrados son menores a los permisibles en zonas cercanas a la base y en la base misma, llegamos a concluir que basta sólo considerar en cualquier chimenea un sistema equivalente conformado por tan solo 10 masas concentradas.

Los resultados que obtengamos de este sistema equivalente podrán ser considerados como exactos dentro del rango permisible aceptado en los cálculos ingenieriles.

1.6 Determinación del Número de Formas de Modo a Utilizar

Como sabemos, el método conveniente que escogimos para poder realizar el análisis dinámico de cualquier chimenea resultó ser el método matricial.

Además, determinamos que si se discretiza a la estructura en 10 tramos, obtendríamos de ello un sistema equivalente conformado por 10 masas concentradas, cuyas respuestas sísmicas resultantes estarían muy cercanas a los correspondientes valores exactos.

Pretendemos en esta parte de la tesis encontrar el número ideal de modos de vibración que deberíamos considerar para, luego de combinarlos, obtener las respuestas finales de cortantes y momentos actuantes en cualquier chimenea.

Llevaremos a cabo el estudio discretizando a la chimenea con 20 masas concentradas, que son como sabemos, el número necesario para poder considerarla semejante a un sistema de masa continua.

1.6.1 Casos Particulares

Para la determinación del número de formas de modo a utilizar en el cálculo de los cortantes y momentos, se tuvo en cuenta los casos particulares que se muestran en la figura 14.

Consideramos para cada tipo de chimenea una variación en el número de modos combinados, siendo estos iguales a 1, 3, 5, 10, 15 y 20.

Una vez efectuadas las combinaciones, procedemos a comparar los cortantes y momentos adimensionales de cada uno de ellos con los correspondientes valores exactos, que resultan de combinar los 20 modos de vibración.

1.6.2 Gráfico Comparativo de Cortantes y Momentos

En las figuras 19 y 20, se muestran los gráficos adimensionales de cortantes y momentos para los dos casos particulares de chimeneas estudiadas.

Se puede apreciar en cada gráfico la presencia de 6 curvas en distinto tipo de trazo; la leyenda indica el número de modos combinados y el correspondiente trazo que la representa.

Notamos que cuanto mayor sea el número de modos combinados, las respuestas obtenidas poseen mejor aproximación.

Con la finalidad de poder comparar los resultados calculados, se presentan con cada figura dos cuadros con los valores tabulados.

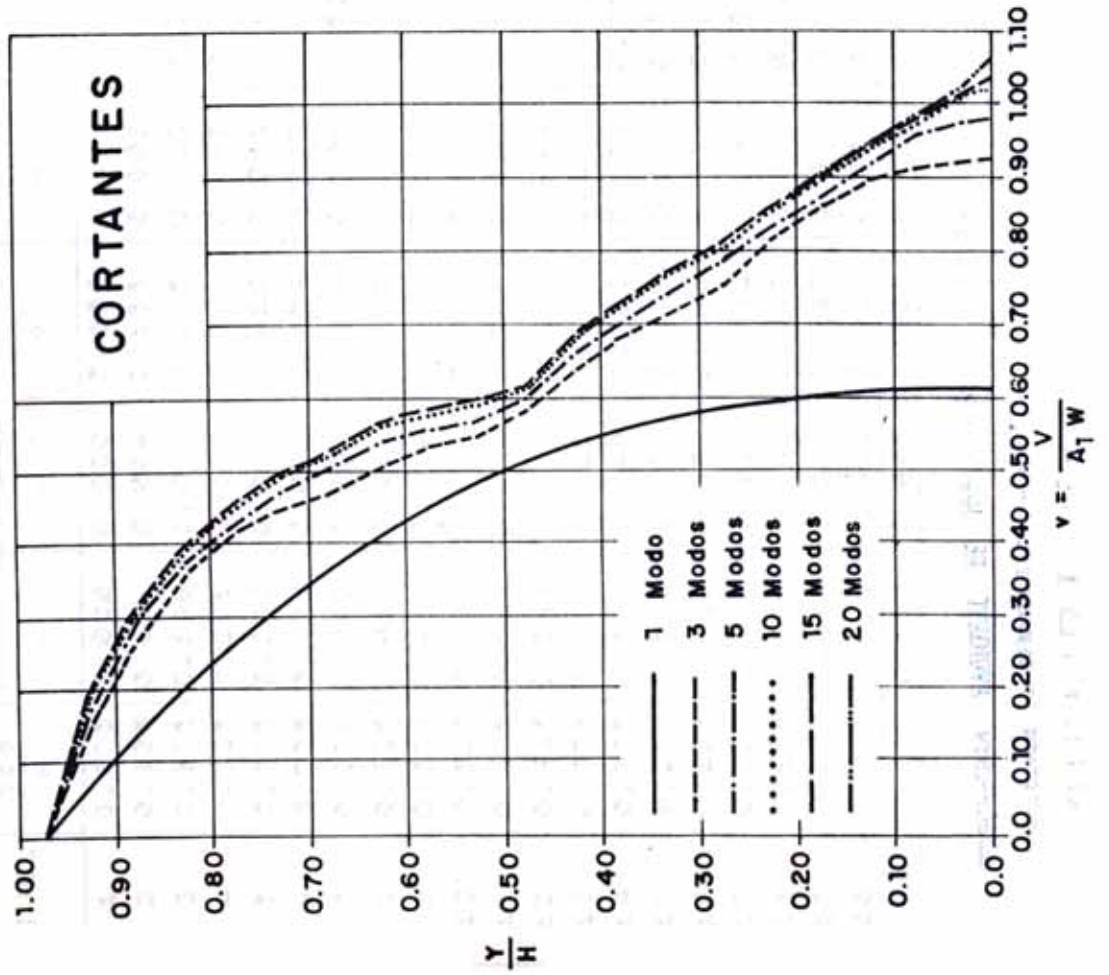
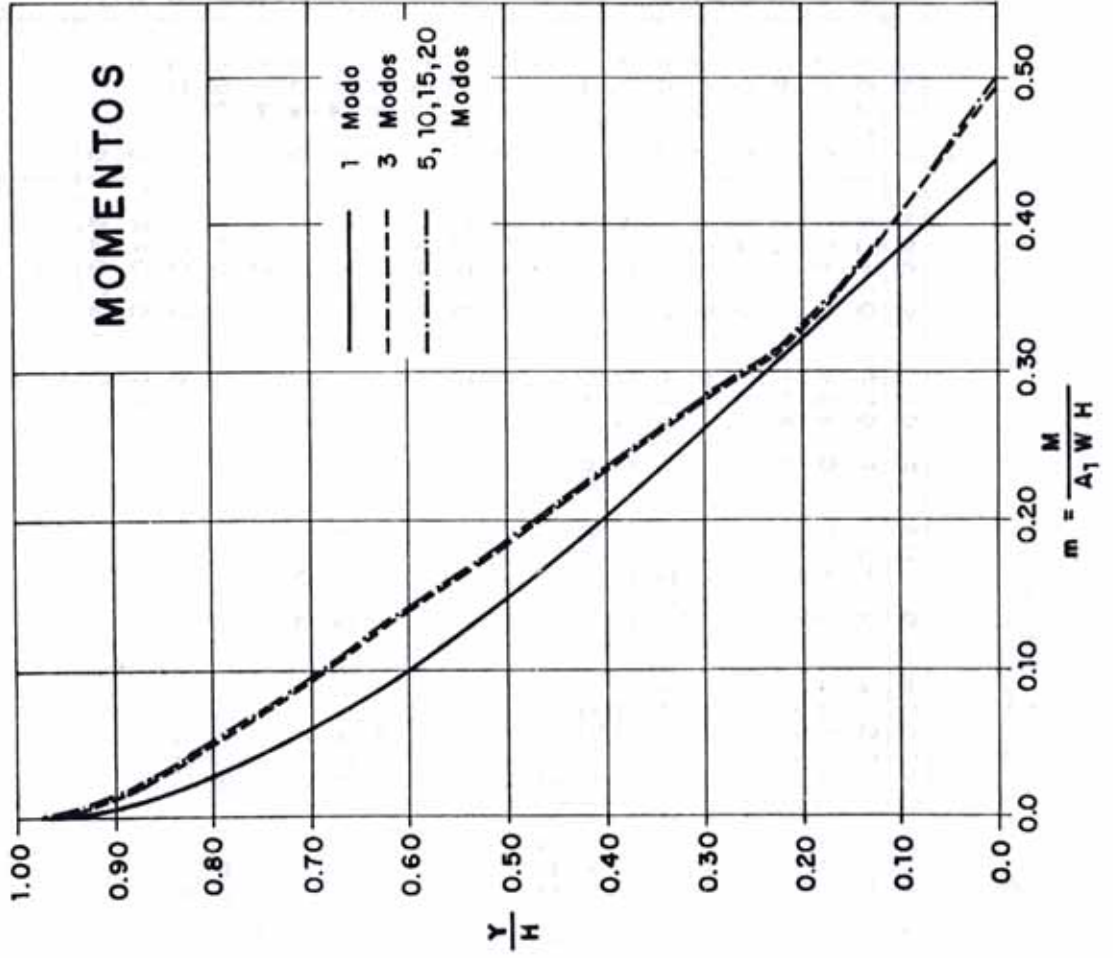
En los Cuadros 7 y 9, tenemos los respectivos cortantes y momentos adimensionales que fueron graficados.

Podemos apreciar que considerar los resultados correspondientes al primer modo de vibración no bastaría para tomarlo como representativo del sistema.

Se mantiene la rápida convergencia de los momentos, mientras que para cortantes no sucede lo mismo.

**FIG.19 DETERMINACION DEL NUMERO DE MODOS DE VIBRAR:
CHIMENEA DE SECCION UNIFORME**

1.- El método utilizado es el matricial, se consideró 20 masas.



CUADRO 7 : COMPARACION DE LOS CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE UNA CHIMNEA DE SECCION UNIFORME CON 20 MASAS CONCENTRADAS

NIVEL	$\frac{V_{eq}}{H}$	1 MODO		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS	
		V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M
1	0.975	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.925	0.076	0.004	0.155	0.008	0.180	0.009	0.204	0.010	0.211	0.011	0.212	0.011
3	0.875	0.146	0.011	0.275	0.022	0.304	0.024	0.314	0.026	0.324	0.026	0.327	0.026
4	0.825	0.211	0.022	0.362	0.040	0.378	0.043	0.398	0.044	0.403	0.044	0.406	0.044
5	0.775	0.270	0.035	0.420	0.061	0.429	0.064	0.452	0.064	0.460	0.065	0.463	0.065
6	0.725	0.325	0.051	0.454	0.083	0.478	0.085	0.499	0.086	0.506	0.086	0.508	0.086
7	0.675	0.373	0.070	0.474	0.106	0.509	0.109	0.525	0.109	0.534	0.109	0.536	0.109
8	0.625	0.417	0.091	0.511	0.129	0.544	0.131	0.565	0.131	0.571	0.132	0.574	0.132
9	0.575	0.456	0.114	0.536	0.152	0.560	0.154	0.582	0.153	0.589	0.155	0.592	0.155
10	0.525	0.490	0.138	0.550	0.174	0.574	0.176	0.595	0.179	0.601	0.179	0.604	0.179
11	0.475	0.518	0.164	0.597	0.197	0.602	0.200	0.615	0.201	0.622	0.201	0.624	0.201
12	0.425	0.543	0.191	0.642	0.223	0.666	0.225	0.687	0.226	0.692	0.226	0.695	0.226
13	0.375	0.563	0.219	0.687	0.247	0.711	0.249	0.733	0.250	0.740	0.250	0.743	0.250
14	0.325	0.579	0.248	0.723	0.271	0.755	0.272	0.776	0.273	0.782	0.274	0.784	0.274
15	0.275	0.591	0.278	0.756	0.293	0.789	0.294	0.806	0.296	0.814	0.296	0.816	0.296
16	0.225	0.600	0.308	0.814	0.314	0.836	0.316	0.857	0.317	0.864	0.317	0.867	0.317
17	0.175	0.607	0.338	0.862	0.348	0.874	0.350	0.896	0.351	0.903	0.352	0.907	0.352
18	0.125	0.611	0.369	0.897	0.386	0.920	0.387	0.939	0.389	0.944	0.389	0.949	0.389
19	0.075	0.613	0.399	0.917	0.430	0.961	0.430	0.974	0.431	0.984	0.432	0.990	0.432
20	0.025	0.613	0.430	0.926	0.474	0.980	0.478	1.015	0.478	1.021	0.478	1.029	0.479
BASE	0.000	0.613	0.445	0.927	0.497	0.982	0.501	1.024	0.503	1.037	0.504	1.065	0.504

donde : $U = \frac{V}{A1.U}$ $Y = \frac{M}{A1.U.H}$

CUADRO B : DETERMINACION DEL NUMERO DE MODOS A COMBINAR.

Yeg /H	1 MODO		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS	
	U	E(%)	U	E(%)	U	E(%)	U	E(%)	U	E(%)	U	E(%)
0.80	0.241	44.6	0.391	10.0	0.404	7.1	0.425	2.2	0.431	0.7	0.435	
0.60	0.437	25.1	0.520	10.2	0.552	5.2	0.573	1.7	0.580	0.5	0.593	
0.40	0.553	23.1	0.664	7.6	0.699	4.3	0.710	1.3	0.716	0.4	0.719	
0.20	0.604	32.0	0.838	5.5	0.855	3.6	0.877	1.2	0.884	0.4	0.887	
BASE	0.613	42.4	0.927	12.9	0.982	7.7	1.024	3.9	1.037	2.7	1.065	
Inf1. Acumul. (%)	1 MODO		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS	
	61.34		86.64		91.95		95.98		97.27		100.00	
Yeg /H	1 MODO		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS	
	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)
0.80	0.028	47.9	0.050	0.1	0.053	2.0	0.054	0.6	0.054	0.2	0.054	
0.60	0.102	20.7	0.140	2.2	0.142	0.9	0.143	0.2	0.143	0.1	0.144	
0.40	0.205	13.9	0.235	1.3	0.237	0.5	0.238	0.1	0.238	0.04	0.238	
0.20	0.323	3.4	0.331	1.1	0.333	0.3	0.334	0.1	0.334	0.03	0.334	
BASE	0.445	11.6	0.497	1.4	0.501	0.5	0.503	0.1	0.504	0.1	0.504	

de: E = Error porcentual

$$E(\%) = \left| 1 - \frac{R_n}{R_{20}} \right| \times 100$$

Rn = Cortante adimensional (u) o Momento adimensional (m) correspondiente a los primeros modos de vibrar

$$u = \frac{U}{A1.W}$$

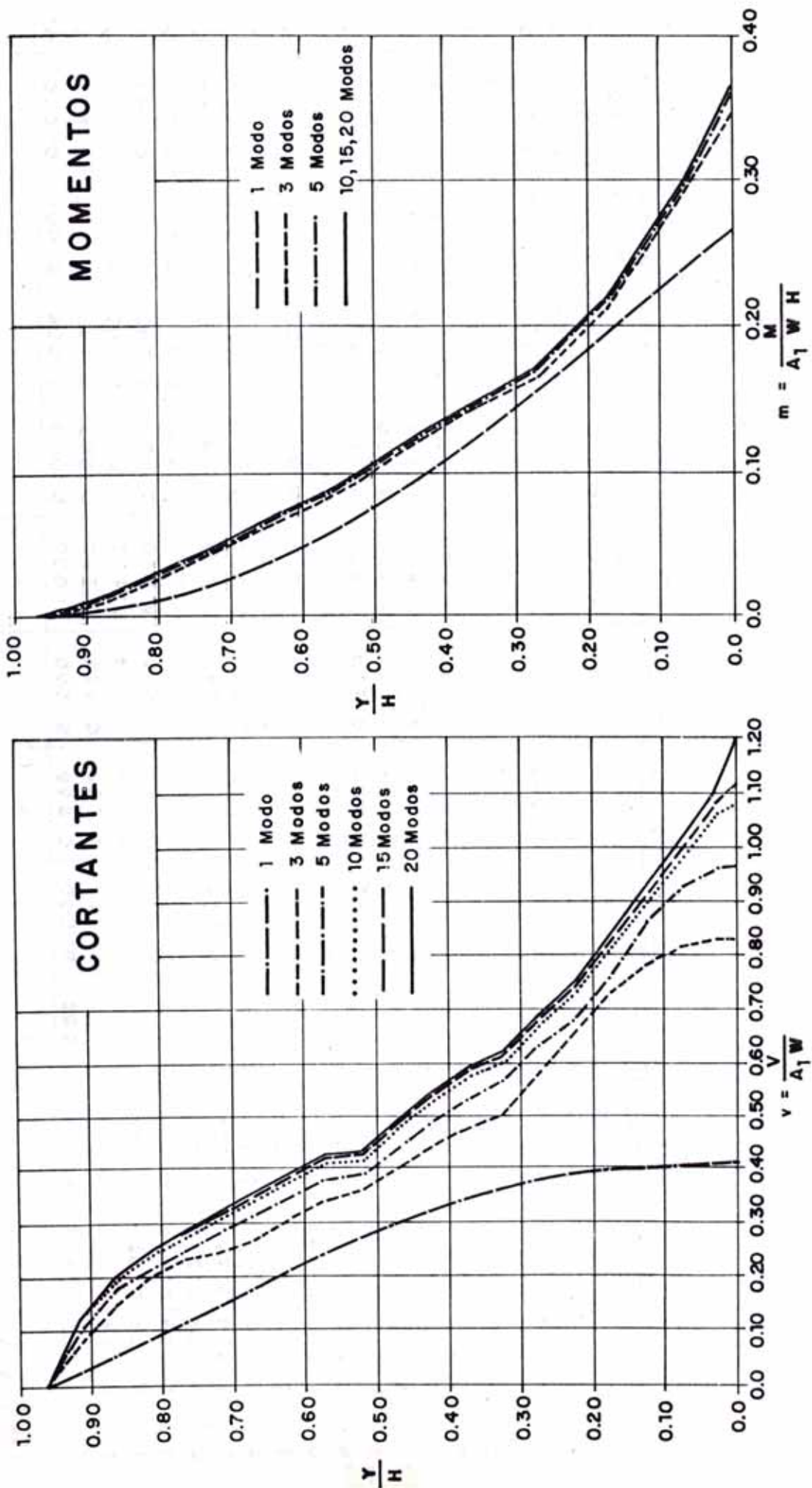
R20 = Cortante adimensional (u) o Momento adimensional (m) correspondiente a los modos de vibrar

$$m = \frac{M}{A1.W.H}$$

FIG.20 DETERMINACION DEL NUMERO DE MODOS DE VIBRAR:

CHIMENEA DE SECCION VARIABLE

CON 28 MASAS CONCENTRADAS
 1.- El método utilizado es el matricial, se consideró 20 masas.



CUADRO 9 : COMPARACION DE LOS CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE UNA CHIMENEA DE SECCION VARIABLE CON 28 MASAS CONCENTRADAS

NIVEL	1 MODO		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS		
	$\frac{V_0}{H}$	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M
1	0.974	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.924	0.027	0.001	0.004	0.109	0.005	0.132	0.007	0.137	0.007	0.137	0.137	0.007
3	0.874	0.056	0.004	0.012	0.180	0.014	0.192	0.016	0.202	0.016	0.202	0.202	0.016
4	0.824	0.088	0.008	0.022	0.219	0.025	0.239	0.026	0.247	0.026	0.247	0.247	0.026
5	0.774	0.120	0.014	0.033	0.247	0.036	0.274	0.037	0.284	0.037	0.284	0.284	0.037
6	0.724	0.159	0.022	0.045	0.283	0.047	0.306	0.048	0.317	0.048	0.320	0.320	0.048
7	0.675	0.186	0.032	0.057	0.315	0.059	0.341	0.060	0.351	0.060	0.356	0.356	0.060
8	0.625	0.218	0.042	0.068	0.344	0.071	0.376	0.072	0.387	0.072	0.392	0.392	0.072
9	0.575	0.249	0.055	0.079	0.379	0.082	0.411	0.084	0.422	0.084	0.428	0.428	0.084
10	0.525	0.278	0.069	0.093	0.398	0.097	0.412	0.098	0.425	0.098	0.425	0.425	0.098
11	0.475	0.304	0.084	0.110	0.440	0.114	0.477	0.115	0.488	0.115	0.495	0.495	0.115
12	0.425	0.328	0.100	0.125	0.467	0.128	0.527	0.130	0.540	0.130	0.549	0.549	0.130
13	0.375	0.349	0.118	0.139	0.533	0.142	0.574	0.144	0.586	0.145	0.594	0.594	0.145
14	0.325	0.366	0.136	0.152	0.568	0.155	0.600	0.158	0.616	0.158	0.625	0.625	0.158
15	0.275	0.380	0.155	0.165	0.631	0.170	0.672	0.172	0.684	0.173	0.695	0.695	0.173
16	0.225	0.391	0.175	0.189	0.678	0.195	0.728	0.197	0.744	0.198	0.755	0.755	0.198
17	0.175	0.398	0.194	0.213	0.755	0.219	0.806	0.221	0.823	0.222	0.834	0.834	0.222
18	0.125	0.403	0.215	0.248	0.854	0.250	0.888	0.253	0.903	0.253	0.920	0.920	0.254
19	0.075	0.406	0.235	0.286	0.924	0.290	0.969	0.291	0.989	0.292	1.010	1.010	0.292
20	0.025	0.407	0.255	0.325	0.956	0.335	1.056	0.338	1.079	0.339	1.102	1.102	0.339
BASE	0.000	0.407	0.265	0.344	0.961	0.358	1.071	0.364	1.107	0.365	1.194	1.194	0.366

donde :

$$U = \frac{V}{A1 \cdot H} \quad V = \frac{M}{A1 \cdot H \cdot H}$$

CUADRO 10 : DETERMINACION DEL NUMERO DE MODOS DE MODOS A COMBINAR.

$\frac{y_{cg}}{H}$	1 MODOS		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS	
	v	E(%)	v	E(%)	v	E(%)	v	E(%)	v	E(%)	v	E(%)
0.00	0.104	61.0	0.216	19.1	0.230	13.9	0.257	3.7	0.266	0.4	0.267	
0.60	0.234	42.9	0.325	20.7	0.362	11.7	0.394	3.9	0.405	1.2	0.410	
0.40	0.339	40.7	0.460	19.6	0.510	10.8	0.551	3.7	0.563	1.6	0.572	
0.20	0.395	50.3	0.691	13.1	0.717	9.8	0.767	3.5	0.784	1.4	0.795	
BASE	0.407	65.9	0.822	31.2	0.961	19.5	1.071	10.3	1.107	7.3	1.194	
Infl. Acumul. (%)	1 MODOS		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS	
	40.70		72.13		82.18		90.71		93.55		100.00	
$\frac{y_{cg}}{H}$	1 MODOS		3 MODOS		5 MODOS		10 MODOS		15 MODOS		20 MODOS	
	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)	M	E(%)
0.00	0.011	65.6	0.028	12.5	0.031	3.1	0.032	0.0	0.032	0.0	0.032	
0.60	0.049	38.0	0.074	6.3	0.077	2.5	0.078	1.3	0.079	0.0	0.079	
0.40	0.105	21.0	0.132	4.3	0.135	2.2	0.137	0.7	0.138	0.0	0.138	
0.20	0.185	11.9	0.201	4.3	0.207	1.4	0.209	0.5	0.210	0.0	0.210	
BASE	0.265	27.6	0.344	6.0	0.358	2.2	0.364	0.5	0.365	0.3	0.366	

donde: E = Error porcentual

Rn = Cortante adimensional (v) o Momento adimensional (m) correspondiente a los "n" primeros modos de vibrar

R20 = Cortante adimensional (v) o Momento adimensional (m) correspondiente a los 20 modos de vibrar

$$E(\%) = \left| 1 - \frac{R_n}{R_{20}} \right| \times 100$$

$$v = \frac{U}{A1.W}$$

$$m = \frac{M}{A1.W.H}$$

En este último, encontrar la convergencia significará determinar el número óptimo de modos de vibración representativos del sistema con el que deberemos de efectuar la combinación recomendada por el R.N.C. (17) para obtener las respuestas finales.

En los Cuadros 8 y 10, se encuentran tabulados los cortantes y momentos adimensionales con las influencias acumuladas de cada caso particular.

En ellos hacemos la comparación de los resultados obtenidos para cada combinación modal con los correspondientes a la combinación de los 20 modos totales.

Podemos apreciar que si consideramos los 10 primeros modos de vibración, los resultados que obtengamos al combinarlos serán lo suficientemente aproximados a los obtenidos luego de combinar los 20.

Para las Fuerzas Cortantes tenemos que el error máximo encontrado en la base es igual al 10.3%, ligeramente mayor al 10%, admisible, mientras que para los momentos flectores el máximo error equivale a 1.3% muy por debajo del 10% y prácticamente insignificante en cálculos de Ingeniería.

En los mismos cuadros notamos que al considerar los 10 primeros modos de vibración como los más significativos del sistema, se obtiene para ambos casos una influencia acumulada superior al 90% recomendado por el R.N.C. (17).

1.6.3 Conclusión

Habiendo verificado la recomendación del Reglamento Nacional de Construcciones (17), determinamos que ésta se cumple al considerar a los 10 primeros modos de vibración como los más significativos del sistema estudiado.

Se descartan a los demás por no ser influyentes en la determinación de las respuestas finales actuantes en la estructura debido a que representa su combinación algo menos del 10% recomendado.

CAPITULO 2

DETERMINACION SIMPLIFICADA DE
LOS PERIODOS DE VIBRACION

2.1 ANALISIS DE CHIMENEAS ADIMENSIONALES

Cuando se trata de presentar ayudas de diseño, el principal problema que se tiene es como plantear las soluciones de manera que los resultados puedan tener una aplicación que englobe a todas las posibles configuraciones de chimeneas.

Es así que, se ha encontrado que la forma de cada una de ellas depende exclusivamente de los valores que adopten sus respectivos espesores y radios medios, o de la relación que existan entre éstos.

Para tener en cuenta a todas las posibilidades, se adoptaron variaciones para cada relación, tal como se muestra en la figura 21.

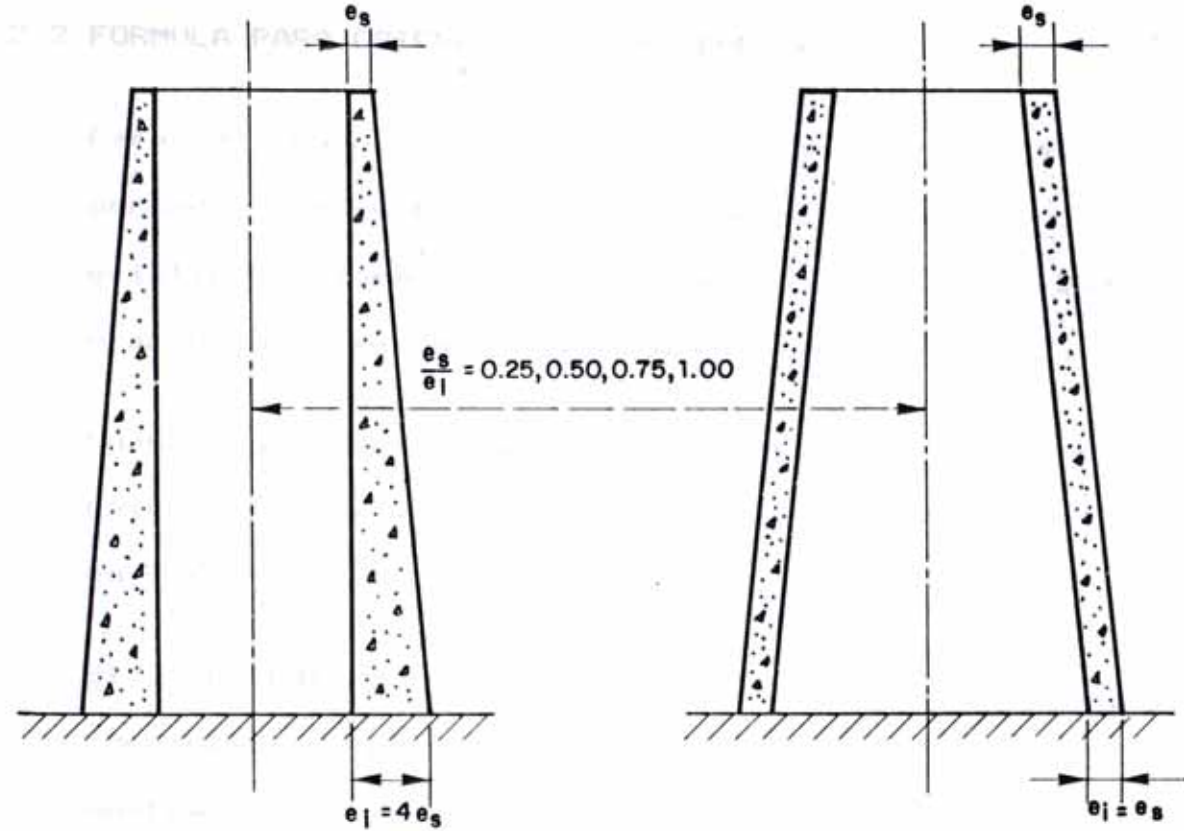
o sea:

$$\frac{\text{espesor superior}}{\text{espesor inferior}} \left[\begin{array}{c} \text{es} \\ \text{ei} \end{array} \right] = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$$

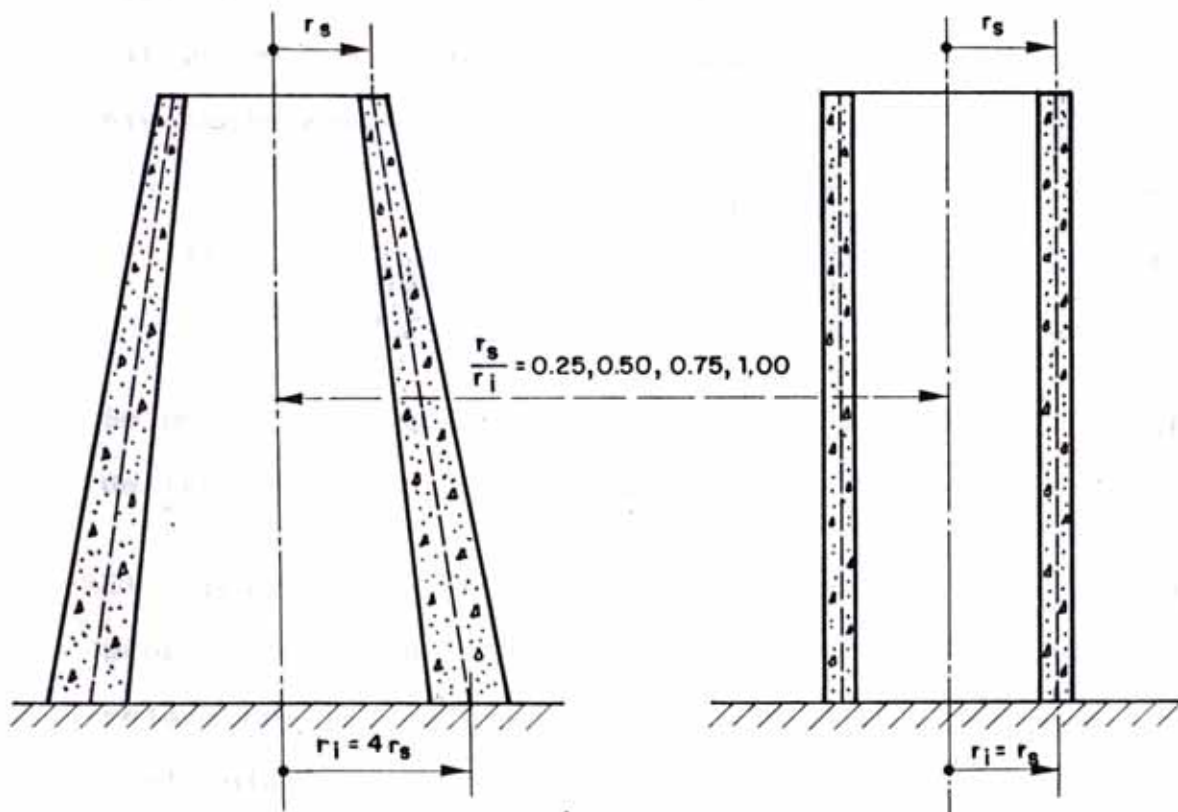
y:

$$\frac{\text{radio medio superior}}{\text{radio medio inferior}} \left[\begin{array}{c} \text{rs} \\ \text{ri} \end{array} \right] = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$$

Obteniendo de esta forma, una gama de $4 \times 4 = 16$ chimeneas o modelos, de diferentes características, denominándose a cada una de ellas, CHIMENEAS ADIMENSIONALES, por estar definidas por éstas dos relaciones.



a).- Variación del espesor.



b).- Variación del radio medio.

NUMERO TOTAL DE VARIACIONES = $4 \times 4 = 16$

FIG.21 VARIACION DEL ESPESOR Y RADIO MEDIO

2.2 FORMULA PARA OBTENER LOS PERIODOS DE VIBRACION

Para el caso de chimeneas de sección uniforme, los periodos de vibración son perfectamente conocidos, existiendo fórmulas que permiten encontrar valores exactos para sus diferentes modos (ver acápite 1.3.2).

Cuando se trata de chimeneas de sección variable, el cálculo se complica y no es posible determinar su valor en forma exacta con alguna fórmula.

El procedimiento seguido en esta investigación consistió en procesar las 16 chimeneas adimensionales, mostradas en el acápite 2.1, utilizando el método matricial escogido (14).

Pudimos encontrar que el periodo fundamental de vibración de cualquier chimenea queda expresado de la siguiente manera:

$$T_1 = f \cdot \frac{1.2493 \cdot H^2}{\sqrt{(r_i^2 + \frac{e_i^2}{4}) \cdot E}} \cdot \left[\frac{W}{W_e} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ en seg} \quad \dots(1)$$

Se puede notar que la ecuación (1), consta básicamente de tres factores.

El primero, se refiere a la constante de proporcionalidad "f", cuyo valor depende de las relaciones e_s/e_i y r_s/r_i , de alguna chimenea en particular.

El segundo, es un factor que depende exclusivamente de las características físicas y geométricas que posea la chimenea, siendo directamente proporcional al cuadrado de su altura e inversamente a su radio medio y espesor de la base, incluyendo también a su módulo de elasticidad.

Finalmente, el tercero consiste en una relación de pesos, donde W representa el peso total de la chimenea incluyendo el recubrimiento refractario y W_e es el peso de la estructura de concreto armado.

Es necesario indicar que esta fórmula propuesta calcula los periodos fundamentales de vibración de cualquier chimenea sometida tan solo a los efectos de flexión. Si tuviéramos en cuenta las deformaciones por corte, tendríamos que para relaciones de $H/D \geq 4.5$ el error que se comete al despreciar su influencia sería menor o igual al 5%, de la misma manera encontramos que si la relación $H/D \geq 7$ el error estaría por debajo del 2%. Esto significa que a medida que la relación H/D se hace pequeña, el error cometido crece rápidamente con lo cual será necesario considerar el efecto de corte, mientras que si la relación H/D es grande, su participación es prácticamente insignificante. Para mayor detalle ver el Anexo C.

Además, hemos creído necesario considerar los periodos del segundo y tercer modo de vibración, disponiéndose

para cada caso de valores correspondientes a la relación que cada uno de ellos posee con el periodo fundamental T_1 .

En la figura 22, se muestra una chimenea típica acompañada de sus características esenciales y más abajo, se encuentra un cuadro en donde se tabulan los valores de la constante de proporcionalidad "f" y los valores para el segundo (T_1/T_2) y tercer (T_1/T_3) modo de vibración, correspondiente a cada relación de espesores y radios medios.

Con la finalidad de poder facilitar el cálculo de las constantes antes mencionadas y evitar el tener que interpolar, se presentan en la figura 23 tres gráficos correspondientes a cada uno de los periodos de vibración. Las cuatro curvas trazadas corresponden a las relaciones de espesores consideradas, variando cada una de ellas de acuerdo a la variación que posean los radios medios.

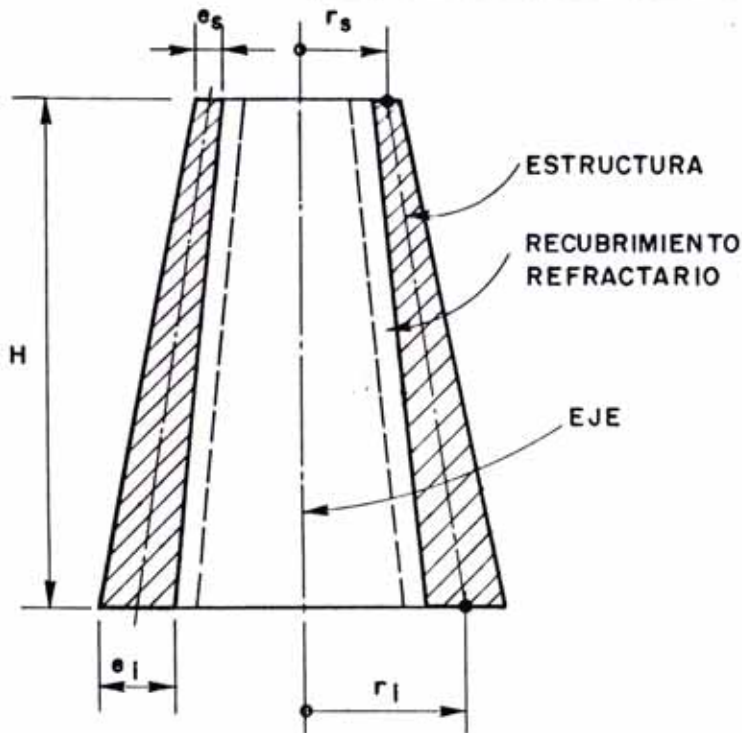
2.3 EVALUACION COMPARATIVA DE LOS PERIODOS DE VIBRACION

Para verificar la validez de la fórmula propuesta, fue necesario compararla con otras formulaciones existentes.

Con tal motivo, contamos con tres expresiones que nos permiten calcular el periodo fundamental T_1 de cualquier chimenea, caracterizándose las dos primeras

FIG. 22

**PERIODOS DE VIBRACION PARA CHIMENEAS
DE SECCION VARIABLE**



W_e = Peso de la estructura.

$W = W_e +$ Peso del recubrimiento refractario.

T_n = Período de vibración del modo "n".

H, r, e = En metros.

$E = t_n/m^2$ (módulo de elasticidad)

Fórmula propuesta por Rivera y Fernández - Dávila :

$$T_1 = f \frac{1.2493 H^2}{\sqrt{(r_i^2 + e_i^2/4) E}} \left(\frac{W}{W_e}\right)^{1/2}$$

f : Se puede obtener del siguiente cuadro :

e_s/e_i	1.00				0.75				0.50				0.25			
r_s/r_i	1.00	0.75	0.50	0.25	1.00	0.75	0.50	0.25	1.00	0.75	0.50	0.25	1.00	0.75	0.50	0.25
f	1.00	0.98	0.94	0.87	0.92	0.90	0.87	0.81	0.82	0.81	0.78	0.74	0.69	0.68	0.67	0.63
T_1/T_2	6.28	5.58	4.78	3.84	5.91	5.26	4.53	3.66	5.45	4.87	4.22	3.43	4.87	4.37	3.81	3.13
T_1/T_3	17.59	15.10	12.35	9.18	16.27	14.01	11.52	8.62	14.66	12.68	10.48	7.92	12.61	10.96	9.13	6.98

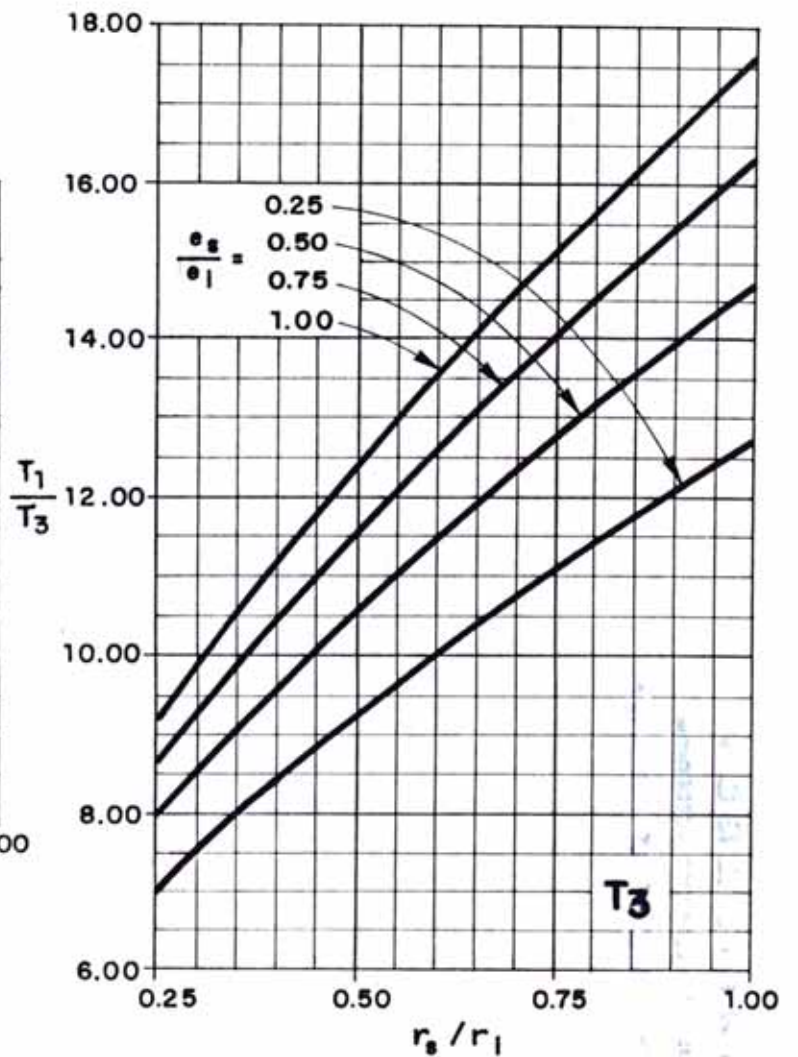
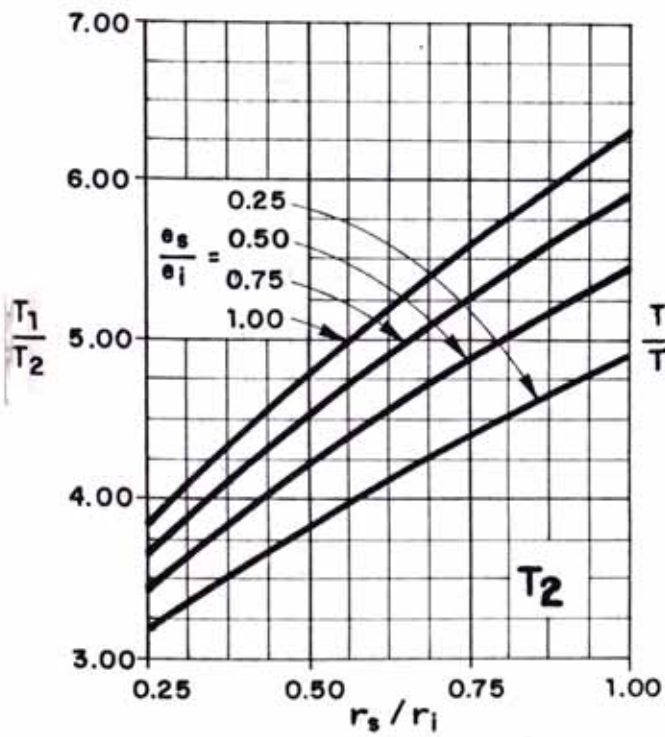
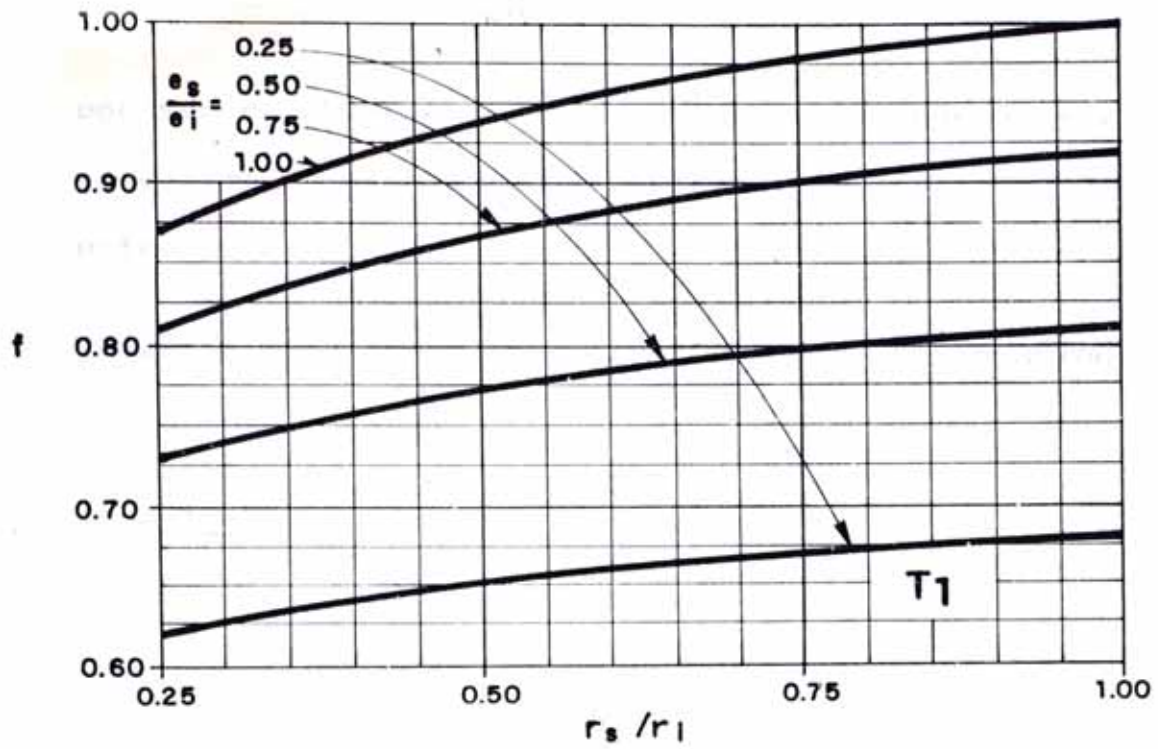


FIG.23 DIAGRAMAS PARA DETERMINAR LOS PERIODOS DE VIBRACION

por ser de aplicación directa, mientras que para usar la última es necesario discretizar arbitrariamente a la estructura.

Estas expresiones, son las que a continuación se muestran:

1. ACI - 307 (15)

$$T1 = 1.5658 \cdot \frac{H^2}{(3D_i - D_s) \cdot E} \cdot \left[\frac{W}{W_e} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ en seg}$$

donde:

H = Altura total de la chimenea (mt)

D_i = Diámetro exterior en la base (mt)

D_s = Diámetro exterior en la parte superior (mt)

E = Módulo de elasticidad (Kg/cm²)

W = Peso total de la chimenea, incluyendo el recubrimiento refractario (ton)

W_e = Peso de la estructura (ton)

2. G.W. Housner - W.O. Keightley (16)

$$T1 = 2.5375 \cdot \left[\frac{\delta_c \cdot H^4}{\Omega_1^2 \cdot E \cdot (D_i^2 + d_i^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ en seg}$$

donde:

H = Altura total de la chimenea (mt)

D_i = Diámetro exterior en la base (mt)

d_i = Diámetro interior en la base (mt)

- D_s = Diámetro exterior en la parte superior (mt)
 e_i, e_s = Espesores inferior y superior (mt)
 r_i, r_s = Radios medios inferior y superior (mt)
 E = Módulo de elasticidad (kg/cm²)
 δ_c = Peso específico de la chimenea (ton/m³)
 Ω_1^2 = Constante que depende de las relaciones r_1
 y r_2
 r_1 = Relación de los diámetros medios, superior
 e inferior
 $= (D_s - e_s) / (D_i - e_i) = r_s / r_i$
 r_2 = Relación de los espesores, superior e
 inferior
 $= e_s / e_i$

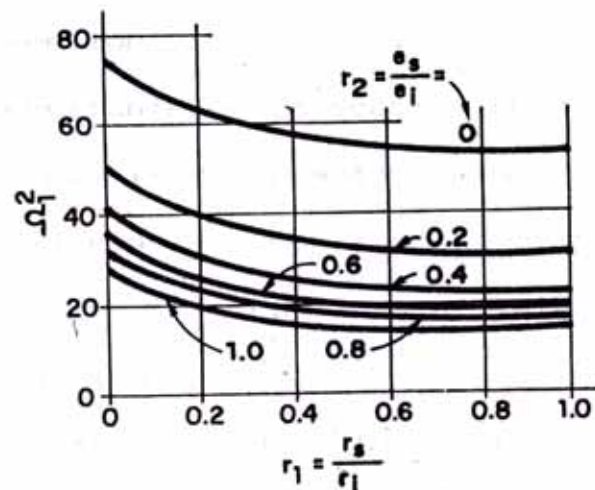


FIG. 24 CONSTANTE Ω_1^2 PARA CALCULAR EL PERIODO FUNDAMENTAL.

3. Warren W. Mitchell (16)

$$T1 = 0.1984 \cdot H^2 \cdot \sqrt{\frac{\Sigma(w \cdot \Delta\alpha) + (1/H)\Sigma(P \cdot \beta)}{\Sigma \bar{E} \cdot D^3 \cdot e \cdot \Delta\delta}} \quad \text{en seg}$$

donde:

H = Altura de la chimenea (mt)

w = Peso por unidad de longitud, del tramo considerado de sección uniforme (ton/mt)

P = Cargas concentradas que pueden estar unidas a la chimenea en algún nivel, incrementando solo su masa sin alterar la rigidez (ton)

\bar{E} = Módulo de elasticidad de la sección en estudio (kg/cm²)

D = Diámetro medio de cada sección (mt)

e = Espesor de cada sección (mt)

$\Delta\alpha$ = diferencia en los valores de α entre los extremos superior e inferior de cada sección

β = Constante de la sección en donde las cargas concentradas P están unidas a la chimenea

$\Delta\delta$ = diferencia en los valores δ entre los extremos superior e inferior de cada sección

Σ = Sumatoria de los productos de las cantidades mostradas a lo alto de la chimenea

Es necesario aclarar que este método consiste básicamente en dividir a la chimenea, en tantas partes como resulte conveniente, encontrándose en cada una de ellas una sección representativa que por lo general se ubica en la mitad del tramo, o más exactamente, en su respectivo centro de gravedad. En dicha sección se calculará el valor de w , \bar{E} , D y e .

Para obtener los parámetros α , β y δ en los extremos superior e inferior de cada sección, se cuenta con la tabla extraída del libro de Wiegel (16) que se muestra a continuación y que proporciona dichos valores, dependiendo únicamente de la relación que exista entre la altura en que se encuentra ubicado cada extremo con la altura total de la chimenea.

Con la finalidad de evaluar el grado de aproximación de la fórmula propuesta, con las formulaciones consideradas anteriormente, se efectuó el análisis de 12 chimeneas de distintas características geométricas, presentándose los resultados tabulados en el Cuadro 11.

Como podemos apreciar, hemos considerado los tres primeros modos de vibración calculados del análisis dinámico empleando el método matricial, de igual manera, utilizando la fórmula propuesta obtuvimos los periodos correspondientes, encontrándose resultados satisfactorios.

DESIGN OF EARTHQUAKE-RESISTANT STRUCTURES : TOWERS AND CHIMNEYS

Table 20.1. COEFFICIENTS FOR DETERMINING PERIOD OF VIBRATION OF FREE-STANDING CYLINDRICAL SHELLS HAVING VARYING CROSS SECTIONS AND MASS DISTRIBUTION*

$\frac{h_x}{H}$	α	β	γ	$\frac{h_x}{H}$	α	β	γ
1.00	2.103	8.347	1.000000	0.50	0.1094	0.9863	0.95573
0.99	2.021	8.121	1.000000	0.49	0.0998	0.9210	0.95143
0.98	1.941	7.898	1.000000	0.48	0.0909	0.8584	0.94683
0.97	1.863	7.678	1.000000	0.47	0.0826	0.7987	0.94189
0.96	1.787	7.461	1.000000	0.46	0.0749	0.7418	0.93661
0.95	1.714	7.248	0.999999	0.45	0.0678	0.6876	0.93097
0.94	1.642	7.037	0.999998	0.44	0.0612	0.6361	0.92495
0.93	1.573	6.830	0.999997	0.43	0.0551	0.5872	0.91854
0.92	1.506	6.626	0.999994	0.42	0.0494	0.5409	0.91173
0.91	1.440	6.425	0.999989	0.41	0.0442	0.4971	0.90448
0.90	1.377	6.227	0.999982	0.40	0.0395	0.4557	0.89679
0.89	1.316	6.032	0.999971	0.39	0.0351	0.4167	0.88864
0.88	1.256	5.840	0.999956	0.38	0.0311	0.3801	0.88001
0.87	1.199	5.652	0.999934	0.37	0.0275	0.3456	0.87088
0.86	1.143	5.467	0.999905	0.36	0.0242	0.3134	0.86123
0.85	1.090	5.285	0.999867	0.35	0.0212	0.2833	0.85105
0.84	1.038	5.106	0.999817	0.34	0.0185	0.2552	0.84032
0.83	0.988	4.930	0.999754	0.33	0.0161	0.2291	0.82901
0.82	0.939	4.758	0.999674	0.32	0.0140	0.2050	0.81710
0.81	0.892	4.589	0.999576	0.31	0.0120	0.1826	0.80459
0.80	0.847	4.424	0.999455	0.30	0.010293	0.16200	0.7914
0.79	0.804	4.261	0.999309	0.29	0.008769	0.14308	0.7776
0.78	0.762	4.102	0.999133	0.28	0.007426	0.12576	0.7632
0.77	0.722	3.946	0.998923	0.27	0.006249	0.10997	0.7480
0.76	0.683	3.794	0.998676	0.26	0.005222	0.09564	0.7321
0.75	0.646	3.645	0.998385	0.25	0.004332	0.08267	0.7155
0.74	0.610	3.499	0.998047	0.24	0.003564	0.07101	0.6981
0.73	0.576	3.356	0.997656	0.23	0.002907	0.06056	0.6800
0.72	0.543	3.217	0.997205	0.22	0.002349	0.05126	0.6610
0.71	0.512	3.081	0.996689	0.21	0.001878	0.04303	0.6413
0.70	0.481	2.949	0.996101	0.20	0.001485	0.03579	0.6207
0.69	0.453	2.820	0.995434	0.19	0.001159	0.02948	0.5992
0.68	0.425	2.694	0.994681	0.18	0.000893	0.02400	0.5769
0.67	0.399	2.571	0.993834	0.17	0.000677	0.01931	0.5536
0.66	0.374	2.452	0.992885	0.16	0.000504	0.01531	0.5295
0.65	0.3497	2.3365	0.99183	0.15	0.000368	0.01196	0.5044
0.64	0.3269	2.2240	0.99065	0.14	0.000263	0.00917	0.4783
0.63	0.3052	2.1148	0.98934	0.13	0.000183	0.00689	0.4512
0.62	0.2846	2.0089	0.98789	0.12	0.000124	0.00506	0.4231
0.61	0.2650	1.9062	0.98630	0.11	0.000081	0.00361	0.3940
0.60	0.2464	1.8068	0.98455	0.10	0.000051	0.00249	0.3639
0.59	0.2288	1.7107	0.98262	0.09	0.000030	0.00165	0.3327
0.58	0.2122	1.6177	0.98052	0.08	0.000017	0.00104	0.3003
0.57	0.1965	1.5279	0.97823	0.07	0.000009	0.00062	0.2669
0.56	0.1816	1.4413	0.97573	0.06	0.000004	0.00034	0.2323
0.55	0.1676	1.3579	0.97301	0.05	0.000002	0.00016	0.1966
0.54	0.1545	1.2775	0.97007	0.04	0.000001	0.00007	0.1597
0.53	0.1421	1.2002	0.96688	0.03	0.000000	0.00002	0.1216
0.52	0.1305	1.1259	0.96344	0.02	0.000000	0.00000	0.0823
0.51	0.1196	1.0547	0.95973	0.01	0.000000	0.00000	0.0418
				0.	0.	0.	0.

*MitscheFormula: $T = \left(\frac{H}{100}\right)^2 \sqrt{\frac{\sum w \Delta \alpha + (1/H) \sum P \beta}{\sum E D^3 \Delta \gamma}}$

CUADRO 11: EVALUACION COMPARATIVA DE LOS PERIODOS DE VIBRACION

TIPO DE CHIMENERA	$\frac{r_3}{r_1}$	$\frac{e_3}{e_1}$	$S = \frac{r_3 \cdot e_3}{r_1 \cdot e_1}$	PERIODOS DE VIBRACION (seg)															
				METODO MATRICIAL						FORMULA PROPUESTA						HOUSNER		MITCHELL	
				T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T1	T1			
CH1	1.00	1.00	1.00	2.54	0.40	0.14	2.54	0.40	0.14	0.14	2.20	2.50	2.59						
CH2	0.75	1.00	0.75	2.48	0.44	0.16	2.49	0.45	0.16	0.16	1.99	2.43	2.47						
CH3	0.50	1.00	0.50	2.38	0.49	0.19	2.39	0.50	0.19	0.19	1.81	2.37	2.29						
CH4	0.50	0.50	0.25	1.97	0.47	0.19	1.96	0.46	0.19	0.19	1.76	1.90	1.87						
CH5	0.50	0.25	0.125	1.67	0.43	0.18	1.65	0.43	0.18	0.18	1.74	1.60	1.60						
CH6	0.25	0.25	0.0625	1.58	0.50	0.22	1.58	0.50	0.22	0.22	1.60	1.48	1.42						
CH7(r)	1.00	1.00	1.00	2.64	0.45	0.16	2.64	0.45	0.16	0.16	2.46	2.80	2.87						
CH8(r)	0.75	1.00	0.75	2.75	0.49	0.18	2.77	0.50	0.18	0.18	2.21	2.71	2.74						
CH9(r)	0.50	1.00	0.50	2.61	0.54	0.21	2.64	0.55	0.21	0.21	2.00	2.65	2.51						
CH10(r)	0.50	0.50	0.25	2.32	0.54	0.22	2.24	0.53	0.22	0.22	2.01	2.12	2.19						
CH11(r)	0.50	0.25	0.125	2.13	0.54	0.22	1.94	0.54	0.21	0.21	2.04	1.79	1.99						
CH12(r)	0.25	0.25	0.0625	1.96	0.61	0.27	1.83	0.58	0.25	0.25	1.85	1.65	1.72						

H = 76 mt.

e = 0.60 mt.

r = 1.90 mt.

f'c = 210 k/cm²

Notamos que los periodos calculados con las formulaciones presentadas, otorgan valores cercanos a los hallados con la fórmula propuesta.

Es evidente que los periodos calculados con la fórmula del ACI - 307, difieren demasiado con los valores exactos correspondientes al análisis dinámico, encontrándose que las formulaciones de Housner y Mitchell, son las que mejores resultados otorgan, debido fundamentalmente a su mayor aproximación.

Para una mejor claridad mostraremos los cálculos realizados para obtener el periodo fundamental de una chimenea, empleando cada una de las tres fórmulas presentadas.

Ejemplo:

Esta chimenea particular es de sección uniforme y además, la primera de las 12 que hemos considerado para efectuar la comparación siendo sus características principales las que a continuación mostramos:

$$H = 76 \text{ mt}$$

$$r = 1.9 \text{ mt}$$

$$e = 0.6 \text{ mt}$$

$$f'c = 210 \text{ k/cm}^2$$

No tiene recubrimiento interior

Formula del ACI

Por no existir recubrimiento interior, el peso total de la chimenea es igual al peso de la estructura, entonces:

$$E = 15000\sqrt{210} \text{ K/cm}^2$$

$$E = 217370.65 \text{ K/cm}^2$$

luego:

$$T1 = 1.5658 \cdot \frac{(76)^2}{(3 \cdot 4.4 - 4.4) \cdot \sqrt{217370.65}} \cdot (1)^{\frac{1}{2}}$$

$$T1 = 2.20 \text{ seg}$$

Fórmula de Housner - Keightley

$$\delta_c = 2.4 \text{ ton/m}$$

$$D_i = 4.4 \text{ mt}$$

$$d_i = 3.2 \text{ mt}$$

$$D_s = 4.4$$

entonces:

$$r1 = \frac{4.4 - 0.6}{4.4 - 0.6} = 1$$

$$r2 = \frac{0.6}{0.6} = 1$$

del gráfico de la figura 24 encontramos el valor de la constante igual a:

$$\Omega_1^2 = 12.85$$

luego:

$$T_1 = 2.5375 \cdot \left[\frac{2.4 \cdot (76)^4}{12.85 \cdot 217370.65 \cdot (4.4^2 + 3.2^2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$T_1 = 2.50 \text{ seg}$

Fórmula de Mitchell

Para calcular el periodo fundamental de esta chimenea particular de sección uniforme, se dividió a la estructura en 10 tramos, ubicándose cada sección en el centro de gravedad del tramo correspondiente.

Como el peso de la chimenea es:

$$P = 1306.51 \text{ ton}$$

$$H = 76 \text{ mt}$$

entonces:

$$w = \frac{P}{H} = \frac{1306.51}{76}$$

$$w = 17.191 \text{ ton/mt}$$

Como el módulo de elasticidad es constante en toda su altura, se tendrá:

$$\bar{E} = E = 15000 \text{ 210 k/cm}^2$$

entonces:

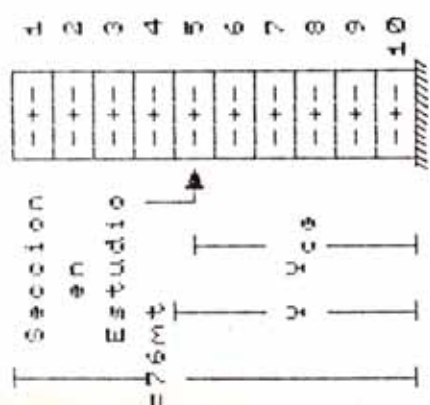
$$E = 217370.65 \text{ k/cm}^2$$

En el Cuadro 12, se encuentran todos los valores tabulados, necesarios para encontrar T_1 , el cual resulta ser igual a:

$T_1 = 2.58 \text{ seg}$

CUADRO 12: CALCULO DEL PERIODO FUNDAMENTAL USANDO EL METODO DE WARREN W. MITCHELL

$\frac{y}{H}$	$\frac{y \text{ en } H}{H}$	w	α	$\Delta \alpha$	$w \cdot \Delta \alpha$	y	Δy	$ED^3 t \cdot \Delta y$
1.00	0.95	17.191	2.103	0.726	12.481	1.000000	0.000016	128.818
0.90	0.85	17.191	1.377	0.530	9.111	0.999982	0.000527	3771.495
0.80	0.75	17.191	0.847	0.366	6.292	0.999455	0.003354	24003.027
0.70	0.65	17.191	0.481	0.2346	4.033	0.996101	0.011551	92665.164
0.60	0.55	17.191	0.2464	0.137	2.355	0.98455	0.02882	206251.409
0.50	0.45	17.191	0.1094	0.0699	1.202	0.95573	0.05894	421806.316
0.40	0.35	17.191	0.0395	0.029207	0.502	0.89679	0.10539	754227.479
0.30	0.25	17.191	0.010293	0.008808	0.151	0.7914	0.1707	1221620.938
0.20	0.15	17.191	0.001485	0.001434	0.025	0.6207	0.2568	1997798.810
0.10	0.05	17.191	0.000051	0.000051	0.001	0.3639	0.3639	2604263.968
0.00			0.000000			0.0000		
			Σ		36.153		Σ	7156537.424



$$T_1 = 0.1984 H^2 \sqrt{\frac{\Sigma w \Delta \alpha + (1/H) \Sigma P B}{\Sigma ED^3 t \Delta y}}$$

$$T_1 = 0.1984 (76^2) \sqrt{\frac{36.153 + 0}{7156537.424}} = 2.58 \text{ seg.}$$

CAPITULO 3

DIAGRAMAS ADIMENSIONALES DE
CORTANTES Y MOMENTOS

3.1 Fuerzas de Inercia

Una vez realizado el análisis dinámico de cualquier chimenea empleando el método matricial escogido, encontramos que los elementos esenciales que definen sus características dinámicas (5) son los siguientes:

- 1) Gama de frecuencias circulares ω_j de oscilación, llamados valores propios
- 2) Totalidad de las formas propias de oscilación, X_{ij} , denominadas vectores propios.

Con estos elementos podemos calcular las fuerzas de inercia que actúan en los diferentes niveles para cada uno de los modos de vibración considerados en cualquier chimenea (4).

A continuación presentamos la expresión necesaria para calcularlas:

$$F_{ij} = FPM_j \cdot X_{ij} \cdot M_i \cdot \left[\frac{ZUS}{RD} \right] \cdot C_j \cdot g \quad \dots (1)$$

donde:

F_{ij} = representa la fuerza de inercia que actúa en el nivel "i" del modo de vibración "j"

FPM_j = factor de participación modal correspondiente al modo "j"

X_{ij} = desplazamiento modal del nivel "i" en el modo de vibración "j"

h_{β} , h_i = alturas medidas a partir de la base de las masas ubicadas en el nivel " β " y en el nivel " i "

M_i = masa concentrada en el nivel " i "

Z = factor de zona

U = factor de uso e importancia = 1.3

S = factor del tipo de suelo

R_d = factor de ductilidad = 3

$C_j = \frac{0.8}{T_j + 1}$ = coeficiente sísmico correspondiente al modo " j "

T_j = periodo de vibración del modo " j "

T_s = periodo predominante del suelo

La fuerza cortante y el momento flector actuantes en el nivel " i " del modo de vibración " j " son:

$$V_{ij} = \sum_{\beta=1}^{i-1} F_{\beta j} \quad \text{y} \quad M_{ij} = \sum_{\beta=1}^{i-1} F_{\beta j} \cdot (h_{\beta} - h_i) \quad \dots (2)$$

reemplazando (1) en (2), obtenemos:

$$V_{ij} = FPM_j \cdot \sum_{\beta=1}^{i-1} (X_{\beta j} \cdot M_{\beta}) \cdot \left[\frac{ZUS}{RD} \right] \cdot C_j \cdot g$$

y

$$M_{ij} = FPM_j \cdot \sum_{\beta=1}^{i-1} [X_{\beta j} \cdot M_{\beta} \cdot (h_{\beta} - h_i)] \cdot \left[\frac{ZUS}{RD} \right] \cdot C_j \cdot g$$

Combinando las respuestas de cada uno de los modos de vibración, calculamos las fuerzas cortantes y momentos

flectores finales actuantes en cada nivel de la chimenea discretizada, luego:

$$V_i = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij})^2} + \sum_{j=1}^n |V_{ij}| \right] \quad \dots (3)$$

$$M_i = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\sum_{j=1}^n (M_{ij})^2} + \sum_{j=1}^n |M_{ij}| \right]$$

Podemos apreciar que en (3), el término ZUS/RD es un factor común que puede salir de ambas expresiones; para los análisis dinámicos efectuados en este capítulo, se tomó un valor representativo igual a 1.00.

3.2 Cálculo de los Coeficientes Sísmicos

Con la finalidad de conocer como varían los coeficientes sísmicos de una chimenea en el espectro de respuesta, se procedió a calcularlos empleando el criterio que a continuación exponemos.

Básicamente, era necesario saber si de alguna manera podíamos expresar el coeficiente sísmico del modo "n" en función del coeficiente sísmico correspondiente al primer modo de vibración.

Recordemos que el coeficiente sísmico correspondiente al periodo enésimo T_n , se puede calcular de:

$$C_n = \frac{0.80}{\frac{T_n}{T_s} + 1} \quad \dots (1)$$

cuyo valor debe estar comprendido en el rango siguiente:

$$0.16 \leq C_n \leq 0.40$$

De la expresión (1) tenemos que:

$$C_n = \frac{0.80}{\frac{T_n}{T_s} \cdot \frac{T_1}{T_1} + 1}$$

Reordenando:

$$C_n = \frac{0.80}{\frac{T_n}{T_1} \cdot \frac{T_1}{T_s} + 1} \quad \dots (2)$$

En (2) tenemos una expresión que calcula el coeficiente sísmico del modo n -ésimo de vibración, en función de dos relaciones fundamentales:

$\frac{T_n}{T_1}$ = relación entre los periodos correspondientes al n -ésimo y primer modo de vibración

$\frac{T_1}{T_s}$ = relación entre los periodos correspondientes al primer modo de vibración y el periodo predominante del suelo

De esta manera se procedió a calcular el coeficiente sísmico C_n , para distintos valores de T_1/T_s , ya que el valor de la relación T_n/T_1 es constante para cada modo de vibración específico.

El rango de valores que se tomó para T_1/T_s , estuvo conformado por un valor mínimo igual a 0.00 y un valor máximo igual a 10.00, incrementándose esta relación en 0.20.

Empleando el programa de cómputo, se calcularon los coeficientes sísmicos correspondientes a cada uno de los 50 valores considerados para la relación T_1/T_s .

El cálculo mencionado, se realizó en cada una de las 16 chimeneas adimensionales que se escogieron en el capítulo anterior (ver ítem 2.1), encontrándose que el coeficiente sísmico que corresponde al primer modo de vibración clasifica al espectro de respuestas en tres zonas de vital importancia.

3.3 Clasificación del Espectro de Respuesta

El cálculo de los coeficientes sísmicos C_n efectuado en la gama de chimeneas consideradas en el presente estudio, hizo factible que se pudiera condensar la infinidad de posibilidades en que varía el coeficiente sísmico C_1 correspondiente al primer modo de vibración a solo tres situaciones principales, que a nuestro juicio, serían las únicas que representaría a todos los

casos reales que puedan existir en la práctica.

Decimos esto, porque en estructuras elevadas como lo es una chimenea, un valor para la relación de periodos T_1/T_s superior a 10.00, equivale a tener un periodo de vibración en un suelo tipo I superior a 3.00 segundos, resultando cada vez mayor a medida que variemos el tipo de suelo.

Creemos que desde el punto de vista ingenieril, este tiempo resulta ser excesivo para estructuras elevadas tipo chimeneas, pudiéndolo asumir como un valor máximo admisible para los periodos de vibración.

Esto nos permite afirmar que para relaciones de periodos superiores a 10.00, podrán adoptarse conservadoramente los resultados correspondientes a este valor máximo.

En la figura 25, mostramos las tres situaciones en que hemos clasificado el espectro sísmico de respuestas. Podemos apreciar la zona de influencia que el coeficiente sísmico del primer modo de vibración posee en cada caso, además, notemos en los casos CB y CC la participación de los coeficientes sísmicos correspondientes al segundo y tercer modo de vibración.

En el CASO CA, tenemos una situación en que la chimenea se comporta como una estructura rígida, siendo sus características las siguientes:

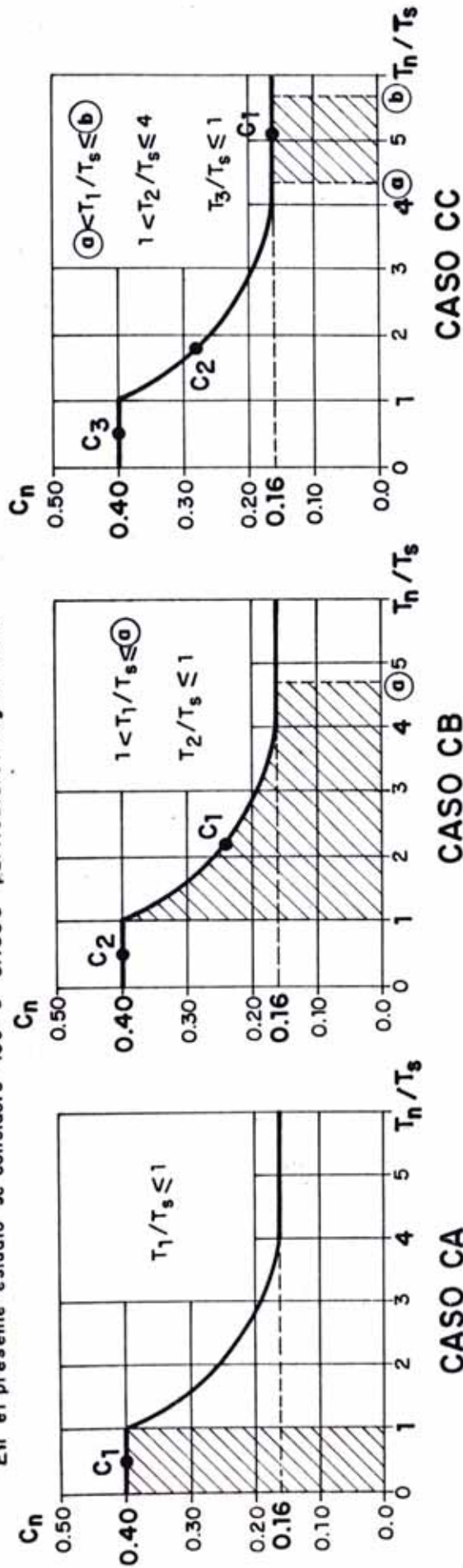
FIG. 25 VARIACION DEL ESPECTRO DE RESPUESTA PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR EMPOTRADAS EN LA BASE

El espectro C de respuesta genérico que da el RNC-Perú (1988) es: $C_n = \frac{0.8}{\frac{T_n}{T_s} + 1}$

T_n = Período seg. del modo n.

T_s = Período predominante del suelo.

En el presente estudio se consideró los 3 CASOS particulares siguientes:



Los límites (a) y (b) se pueden obtener del siguiente cuadro:

es / ei	1.00		0.75		0.50		0.25	
	rs / ri	rs / ri	rs / ri	rs / ri	rs / ri	rs / ri	rs / ri	rs / ri
(a)	1.00	0.75	1.00	0.75	1.00	0.75	1.00	0.75
(b)	6.30	5.60	5.90	5.30	4.55	3.65	3.45	3.15
	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

Rango de periodos : $0.00 < T1/Ts \leq 1.00$

Coefficientes Sísmicos : $C_n = 0.40$ donde $n = 1,2,3\dots$

En el CASO CB, tenemos una situación intermedia en que la chimenea se comporta como una estructura semi rígida, siendo sus características las siguientes:

Rango de periodos : $1.00 < T1/Ts \leq (a)$

Coefficientes Sísmicos : $0.16 \leq C1 < 0.40$

$C_n = 0.40$ donde $n = 2,3,4\dots$

el valor (a) representa la cota superior para el rango de periodos, y es el valor máximo para el cual $C1$ es igual a 0.16 y $C2$ es igual a 0.40 cuando la relación $T2/Ts$ llega a valer 1.00

En el CASO CC, tenemos una situación en que la chimenea se comporta como una estructura flexible (estado en que fue concebida la chimenea, ver ítem 1.1), siendo sus características las siguientes:

Rango de periodos : $(a) < T1/Ts \leq (b)$

Coefficientes Sísmicos : $C1 = 0.16$

$0.16 \leq C2 < 0.40$

$C_n = 0.40$ donde $n = 3,4,5\dots$

el valor (b) representa la cota superior para el rango de periodos, y es el valor máximo para el cual $C1$ es igual a 0.16 y $C3$ es igual a 0.40 cuando la relación $T3/Ts$ llega a valer 1.00.

Hemos asumido como posibles valores de (b), a 10.00 como máximo y a 7.00 como mínimo, tal como lo apreciamos en el cuadro de la figura 25. Podemos calcular para cada uno de ellos el periodo de vibración que existiría en una chimenea que se encuentra ubicada en un suelo tipo I y discutir los resultados obtenidos.

Valor máximo : $T_1/T_s = 10.00$

$$T_1 = (T_1/T_s) \cdot T_s$$

$$T_1 = 10.00 \cdot 0.30 \text{ seg.}$$

$$T_1 = 3.00 \text{ seg.}$$

Valor mínimo : $T_1/T_s = 7.00$

$$T_1 = (T_1/T_s) \cdot T_s$$

$$T_1 = 7.00 \cdot 0.30 \text{ seg.}$$

$$T_1 = 2.10 \text{ seg.}$$

Del cálculo efectuado encontramos que el valor máximo para el periodo fundamental de vibración de cualquier chimenea (asumiendo un suelo tipo I), estaría comprendido en el rango:

$$2.10 \text{ seg.} \leq T_1 \leq 3.00 \text{ seg.}$$

Como ya hemos mencionado, este rango contiene valores elevados para el periodo de vibración T_1 , los cuales serían obtenidos si se presentaran chimeneas de gran altura. Podemos asumir este rango conformado por valores máximos para el periodo T_1 .

Para tener una clara idea de esta observación,

analizaremos dos chimeneas, siendo una de sección uniforme y la otra de sección variable.

Empleando la fórmula presentada en el ítem 2.2, obtendremos el periodo fundamental de vibración que corresponde a cada una de ellas:

$$T_1 = f \cdot \frac{1.2493 \cdot H^2}{\sqrt{\left(\frac{r_i^2 + e_i^2}{4} \right) \cdot E}} \cdot \left[\frac{W}{W_e} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{en seg}$$

donde:

$f = 1.00$ (sección uniforme: $R_s/R_i = 1.00$, $e_s/e_i = 1.00$)

$f = 0.63$ (sección variable: $R_s/R_i = 0.25$, $e_s/e_i = 0.25$)

Consideremos las características geométricas de cualquier chimenea en función de su diámetro medio tal como a continuación mostramos:

$$H = 10D$$

$$e_i = 0.10D$$

$$r_i = 0.50D$$

Además, estamos descartando la existencia de recubrimiento refractario, por lo que la relación de pesos sería igual a la unidad:

$$\frac{W}{W_e} = 1.00$$

Luego, reemplazando estas expresiones en la fórmula anterior tenemos:

$$T_1 = f \cdot \frac{1.2493 \cdot (10D)^2}{\sqrt{(0.5D)^2 + \frac{(0.1D)^2}{4}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{E}} \quad \text{en seg}$$

$$T_1 = f \cdot \frac{248.620}{\sqrt{E}} \cdot D \quad \text{en seg}$$

Consideremos un módulo de elasticidad promedio del concreto armado igual a:

$$E = 2'000,000 \text{ ton/m}^2$$

entonces, la expresión reducida para calcular el primer periodo de vibración se transforma a:

$$T_1 = 0.18fD \quad \text{en seg}$$

Para la chimenea de sección uniforme, el valor del periodo T_1 resulta ser igual al máximo considerado en el rango anterior, del mismo modo que el mínimo valor lo es para el periodo T_1 de la chimenea de sección variable.

Luego, calculando el valor del diámetro medio para cada caso:

$$0.18 \cdot 1.00 \cdot D = 3.00 \quad 0.18 \cdot 0.63 \cdot D = 2.10$$

$$D = 17.0 \text{ mt} \quad D = 18.5 \text{ mt}$$

con estos diámetros medios, las demás características serían:

$$H = 170 \text{ mt}$$

$$e_i = 1.70 \text{ mt}$$

$$r_i = 8.50 \text{ mt}$$

$$H = 185 \text{ mt}$$

$$e_i = 1.85 \text{ mt}$$

$$r_i = 9.25 \text{ mt}$$

Podemos apreciar que debido a los periodos T_1 considerados en cada caso, obtenemos chimeneas muy esbeltas y demasiado elevadas.

Con la explicación presentada, queremos dejar claro que el rango para la relación T_1/T_s comprendido entre 7.00 y 10.00, representa situaciones límites en que pudieran existir chimeneas reales.

Para valores mayores a estos, las chimeneas que les corresponden serían imprácticas en ingeniería, encontrándose para cada una de ellas respuestas conservadoras iguales a las calculadas en sus relaciones de periodos máximos.

Este mismo razonamiento pudo haber sido efectuado para los demás tipos de suelo, pero se escogió al suelo tipo I por poseer menor periodo predominante T_s . Las conclusiones obtenidas son evidentes para los otros dos tipos de suelo.

3.4 Diagramas Adimensionales de Cortantes y Momentos

De la clasificación realizada en el espectro de respuesta tal como se ha visto en el ítem anterior, se calcularon los cortantes y momentos adimensionales para diferentes valores de la relación de periodos T_1/T_s .

En el ítem 3.1 pudimos observar que una vez efectuado el análisis dinámico en alguna chimenea obteníamos sus elementos esenciales como son las frecuencias circulares y los modos de vibración.

Como la estructura se encuentra discretizada en un número máximo de 20 masas concentradas, la fuerza cortante y el momento flector que actúa en cada una de ellas estaría dependiendo básicamente del valor que adopte el coeficiente sísmico correspondiente a cada modo de vibración, debido a que los otros factores que intervienen permanecen constantes en todo momento.

V_{ij} , M_{ij} en función de C_j

Lo que pretendemos es aprovecharnos de esta condición para realizar la evaluación que nos permitiría calcular las respuestas sísmicas para distintas posibilidades del espectro.

En el ítem 3.2 demostramos la relación que existe entre el coeficiente sísmico del n -ésimo modo de vibración y la relación de periodos T_1/T_n . Podemos notar que la relación de periodos T_n/T_1 , resulta ser también una constante propia de cada chimenea.

Por consiguiente, para una estructura en estudio encontramos que los cortantes y momentos adimensionales actuantes en el nivel "i" del modo de vibración "j" correspondientes a un valor asumido para la relación de

periodos $T1/Ts$ podían calcularse.

Después de combinar los modos y calcular los cortantes y momentos finales, se adimensionaron los resultados (ver Item 1.4.3) dividiendo a los primeros por el factor $A1 \cdot W$ y a los segundos por el factor $A1 \cdot W \cdot H$, donde:

$$A1 = \frac{ZUS}{Rd} \cdot C1$$

W = peso total de la estructura en ton.

H = altura total en mt.

Con la ayuda del programa de cómputo, se procedió a calcular los cortantes y momentos adimensionales en cada una de las 16 chimeneas consideradas en esta investigación, para lo cual fue necesario hacer variar en cada modelo el valor de la relación $T1/Ts$ presentados en el ítem 3.3.

Esto significó variar $T1/Ts$ desde 1.00 hasta 13.00, con incrementos de 0.50 para todas las chimeneas, consiguiéndose de esta forma realizar un total de:

$$25 \times 16 = 400 \text{ diseños}$$

de los cuales se escogieron los mas adecuados para ser tabulados y graficados.

A continuación presentamos estos resultados; podemos apreciar que cada uno de ellos corresponden a cierta relación de radios medios y espesores, además, luego de

calcularse el valor de T_1 y conocer el valor de T_s podemos determinar las respuestas que corresponden a la relación de periodos T_1/T_s resultante.

Por lo tanto, las respuestas finales se calcularían empleando las expresiones siguientes:

$$V = v \cdot A_1 \cdot W \quad \text{en ton}$$

$$M = m \cdot A_1 \cdot W \cdot H \quad \text{en ton-mt}$$

donde:

$$W = W_{\text{estructura}} + W_{\text{recubrimiento}} \quad \text{en ton}$$

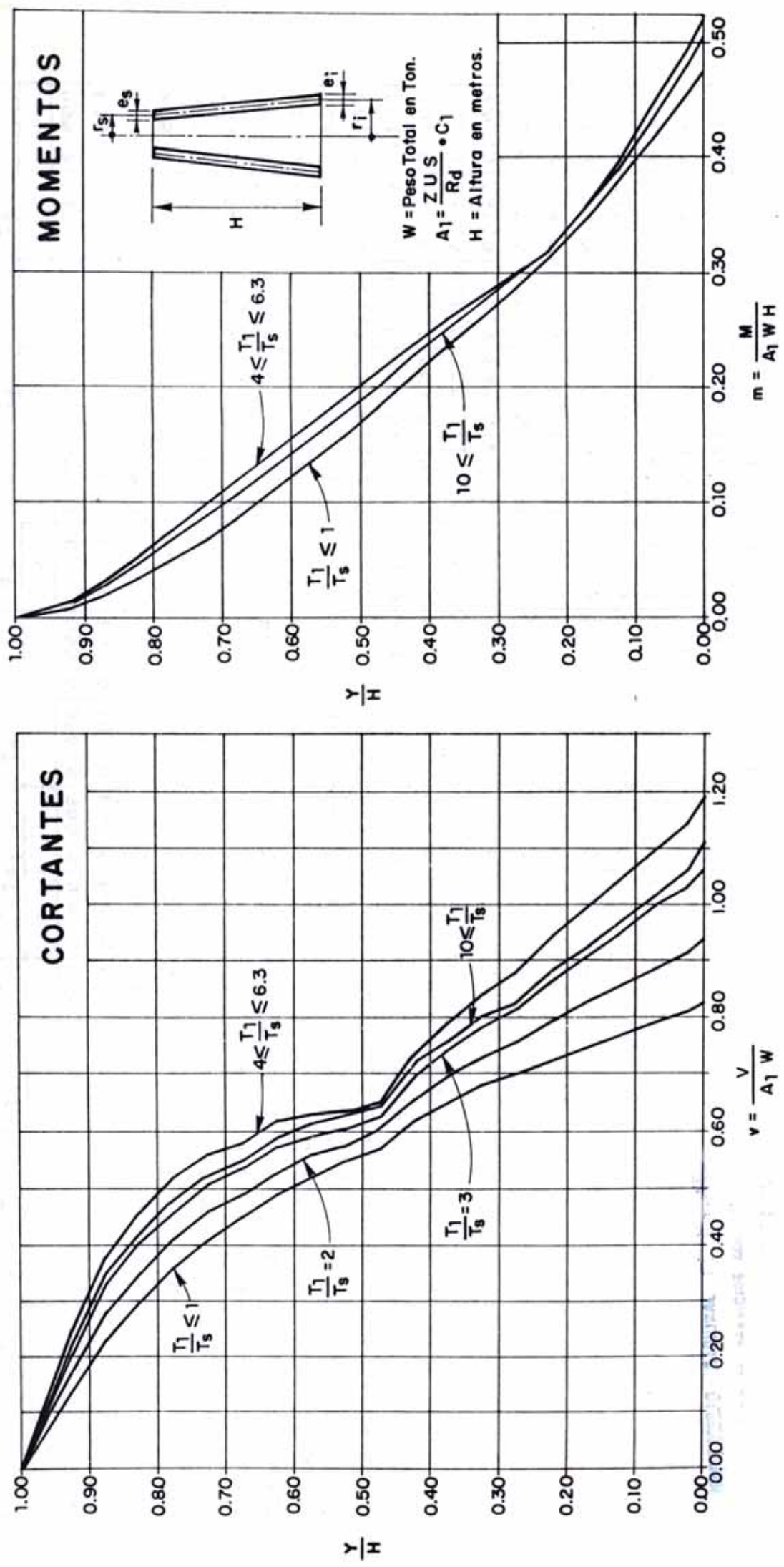
$$W_e = \frac{\pi H}{3} \cdot \delta_c \cdot [(2r_s + r_i) e_s + (2r_i + r_s) e_i]$$

$$W_r = \pi H \cdot e_r \cdot \delta_m \cdot [r_s + r_i - \frac{(e_s + e_i)}{2} - e_r]$$

FIG. 26 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

$$\frac{r_s}{r_i} = 1.00$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 1.00$$



CUADRO 13: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

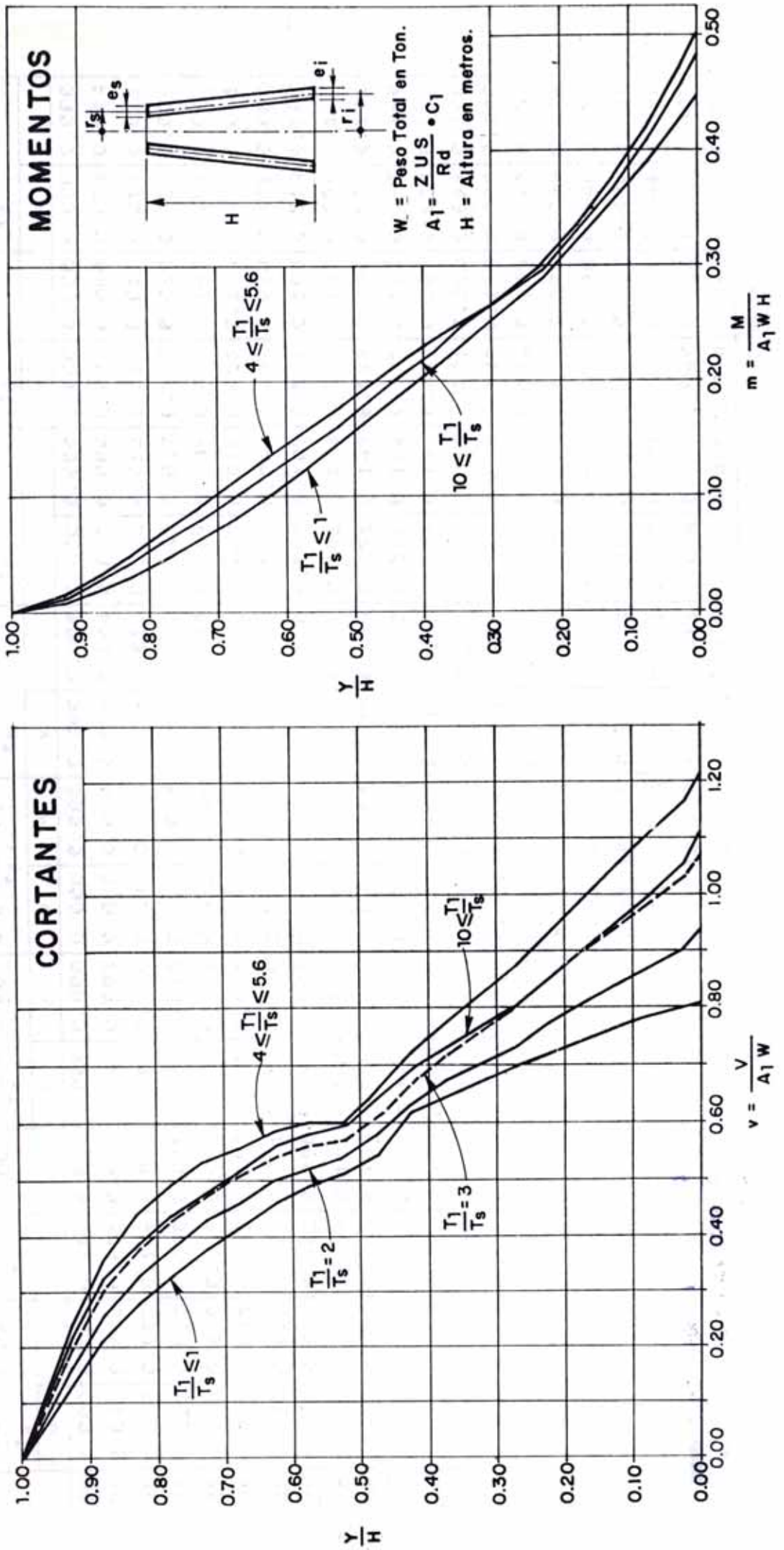
$$v = \frac{V}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{M}{A1.H.H}$$

r_s/r_i	1.00
e_s/e_i	1.00

$\frac{Y}{H}$	$\frac{T1}{T_s} < 1.00$		$\frac{T1}{T_s} = 2.00$		$\frac{T1}{T_s} = 3.00$		$4.0 < \frac{T1}{T_s} < 6.3$		$\frac{T1}{T_s} = 7.00$		$\frac{T1}{T_s} = 8.00$		$\frac{T1}{T_s} = 9.00$		$\frac{T1}{T_s} > 10.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.046	0.002	0.058	0.003	0.070	0.004	0.083	0.004	0.081	0.080	0.004	0.080	0.078	0.004	0.077	0.004
0.925	0.139	0.007	0.174	0.009	0.211	0.011	0.249	0.012	0.244	0.239	0.012	0.239	0.235	0.012	0.231	0.012
0.875	0.228	0.018	0.276	0.022	0.326	0.026	0.377	0.030	0.369	0.360	0.029	0.360	0.352	0.028	0.346	0.028
0.825	0.300	0.032	0.351	0.038	0.405	0.044	0.461	0.051	0.452	0.440	0.048	0.440	0.431	0.047	0.422	0.046
0.775	0.359	0.049	0.409	0.056	0.462	0.065	0.517	0.073	0.507	0.495	0.070	0.495	0.484	0.068	0.475	0.067
0.725	0.410	0.067	0.457	0.076	0.507	0.086	0.559	0.096	0.550	0.538	0.092	0.538	0.528	0.090	0.520	0.088
0.675	0.450	0.088	0.491	0.098	0.535	0.109	0.581	0.120	0.573	0.563	0.115	0.563	0.555	0.112	0.548	0.110
0.625	0.492	0.110	0.532	0.120	0.573	0.132	0.615	0.144	0.610	0.603	0.137	0.603	0.597	0.135	0.592	0.132
0.575	0.522	0.133	0.556	0.144	0.591	0.155	0.627	0.167	0.624	0.620	0.161	0.620	0.617	0.158	0.614	0.155
0.525	0.545	0.156	0.574	0.167	0.603	0.178	0.633	0.189	0.632	0.631	0.183	0.631	0.630	0.180	0.629	0.177
0.475	0.570	0.181	0.596	0.191	0.623	0.201	0.651	0.212	0.650	0.648	0.206	0.648	0.647	0.203	0.646	0.201
0.425	0.620	0.208	0.655	0.217	0.694	0.226	0.735	0.236	0.731	0.726	0.231	0.726	0.722	0.229	0.718	0.227
0.375	0.649	0.234	0.695	0.242	0.742	0.250	0.791	0.258	0.784	0.776	0.254	0.776	0.768	0.253	0.762	0.251
0.325	0.676	0.261	0.728	0.267	0.783	0.273	0.840	0.280	0.830	0.817	0.277	0.817	0.807	0.276	0.798	0.275
0.275	0.696	0.287	0.754	0.291	0.815	0.296	0.879	0.300	0.866	0.850	0.299	0.850	0.836	0.298	0.824	0.298
0.225	0.724	0.313	0.793	0.315	0.865	0.317	0.942	0.320	0.926	0.907	0.320	0.907	0.891	0.319	0.877	0.319
0.175	0.745	0.345	0.823	0.348	0.906	0.352	0.993	0.355	0.975	0.953	0.354	0.953	0.935	0.353	0.919	0.353
0.125	0.767	0.379	0.854	0.384	0.948	0.389	1.045	0.394	1.026	1.003	0.392	1.003	0.984	0.390	0.967	0.389
0.075	0.787	0.415	0.885	0.423	0.988	0.432	1.096	0.440	1.077	1.053	0.436	1.053	1.032	0.434	1.015	0.432
0.025	0.806	0.454	0.913	0.466	1.027	0.478	1.145	0.491	1.125	1.100	0.485	1.100	1.080	0.482	1.062	0.480
0.000	0.823	0.474	0.940	0.488	1.062	0.504	1.190	0.519	1.170	1.145	0.512	1.145	1.125	0.509	1.107	0.506

**FIG. 27 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES
PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR**

$\frac{r_s}{r_i} = 0.75$
$\frac{e_s}{e_i} = 1.00$



CUADRO 14: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.75
e_s/e_i	1.00

$$v = \frac{v}{A_1 \cdot H} \quad , \quad M = \frac{M}{A_1 \cdot H \cdot H}$$

$\frac{y}{H}$	$\frac{T_1}{T_s} < 1.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 2.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 3.00$		$4.0 < \frac{T_1}{T_s} < 6.3$		$\frac{T_1}{T_s} = 5.60$		$\frac{T_1}{T_s} = 7.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 8.00$		$\frac{T_1}{T_s} > 10.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.043	0.002	0.055	0.003	0.068	0.003	0.080	0.004	0.079	0.004	0.077	0.004	0.076	0.004	0.073	0.004
0.925	0.130	0.007	0.166	0.008	0.203	0.010	0.241	0.012	0.238	0.012	0.232	0.012	0.227	0.011	0.219	0.011
0.875	0.213	0.017	0.260	0.021	0.310	0.025	0.361	0.029	0.356	0.028	0.345	0.027	0.337	0.027	0.323	0.026
0.825	0.279	0.030	0.329	0.035	0.383	0.042	0.438	0.048	0.432	0.047	0.419	0.046	0.408	0.045	0.391	0.043
0.775	0.332	0.045	0.381	0.052	0.433	0.061	0.488	0.069	0.481	0.068	0.467	0.066	0.455	0.064	0.437	0.061
0.725	0.380	0.062	0.427	0.071	0.476	0.080	0.528	0.090	0.522	0.089	0.509	0.086	0.498	0.084	0.481	0.080
0.675	0.420	0.081	0.462	0.090	0.506	0.101	0.553	0.112	0.547	0.110	0.537	0.107	0.528	0.104	0.514	0.100
0.625	0.459	0.101	0.499	0.111	0.540	0.122	0.583	0.134	0.579	0.132	0.572	0.128	0.566	0.125	0.556	0.120
0.575	0.488	0.122	0.523	0.132	0.568	0.143	0.597	0.155	0.595	0.153	0.591	0.149	0.588	0.146	0.582	0.141
0.525	0.508	0.143	0.537	0.153	0.566	0.163	0.597	0.174	0.596	0.172	0.596	0.168	0.595	0.165	0.594	0.160
0.475	0.543	0.167	0.576	0.177	0.609	0.187	0.643	0.197	0.642	0.195	0.639	0.192	0.637	0.189	0.634	0.185
0.425	0.585	0.192	0.628	0.200	0.672	0.209	0.717	0.219	0.714	0.217	0.707	0.214	0.701	0.212	0.693	0.208
0.375	0.616	0.216	0.666	0.223	0.718	0.230	0.771	0.238	0.766	0.237	0.754	0.235	0.745	0.233	0.730	0.230
0.325	0.643	0.240	0.699	0.246	0.759	0.252	0.820	0.258	0.813	0.257	0.797	0.256	0.784	0.255	0.763	0.253
0.275	0.668	0.264	0.732	0.268	0.801	0.272	0.872	0.276	0.863	0.276	0.843	0.275	0.826	0.275	0.799	0.274
0.225	0.694	0.290	0.769	0.293	0.849	0.295	0.933	0.298	0.921	0.298	0.897	0.298	0.876	0.298	0.846	0.297
0.175	0.719	0.321	0.805	0.326	0.896	0.330	0.992	0.335	0.979	0.334	0.953	0.333	0.931	0.332	0.896	0.331
0.125	0.742	0.354	0.838	0.360	0.941	0.367	1.049	0.374	1.035	0.373	1.007	0.371	0.983	0.369	0.946	0.366
0.075	0.765	0.389	0.873	0.399	0.988	0.409	1.107	0.420	1.093	0.418	1.064	0.415	1.040	0.412	1.001	0.407
0.025	0.786	0.426	0.905	0.441	1.031	0.456	1.162	0.472	1.148	0.469	1.118	0.465	1.094	0.461	1.055	0.455
0.000	0.806	0.446	0.936	0.463	1.073	0.481	1.214	0.500	1.199	0.497	1.170	0.493	1.145	0.488	1.106	0.481

CUADRO 15: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.50
e_s/e_i	1.00

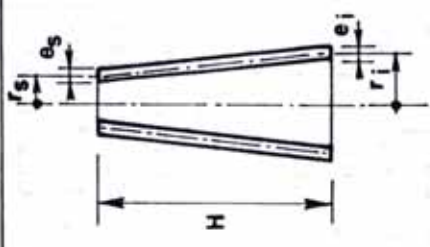
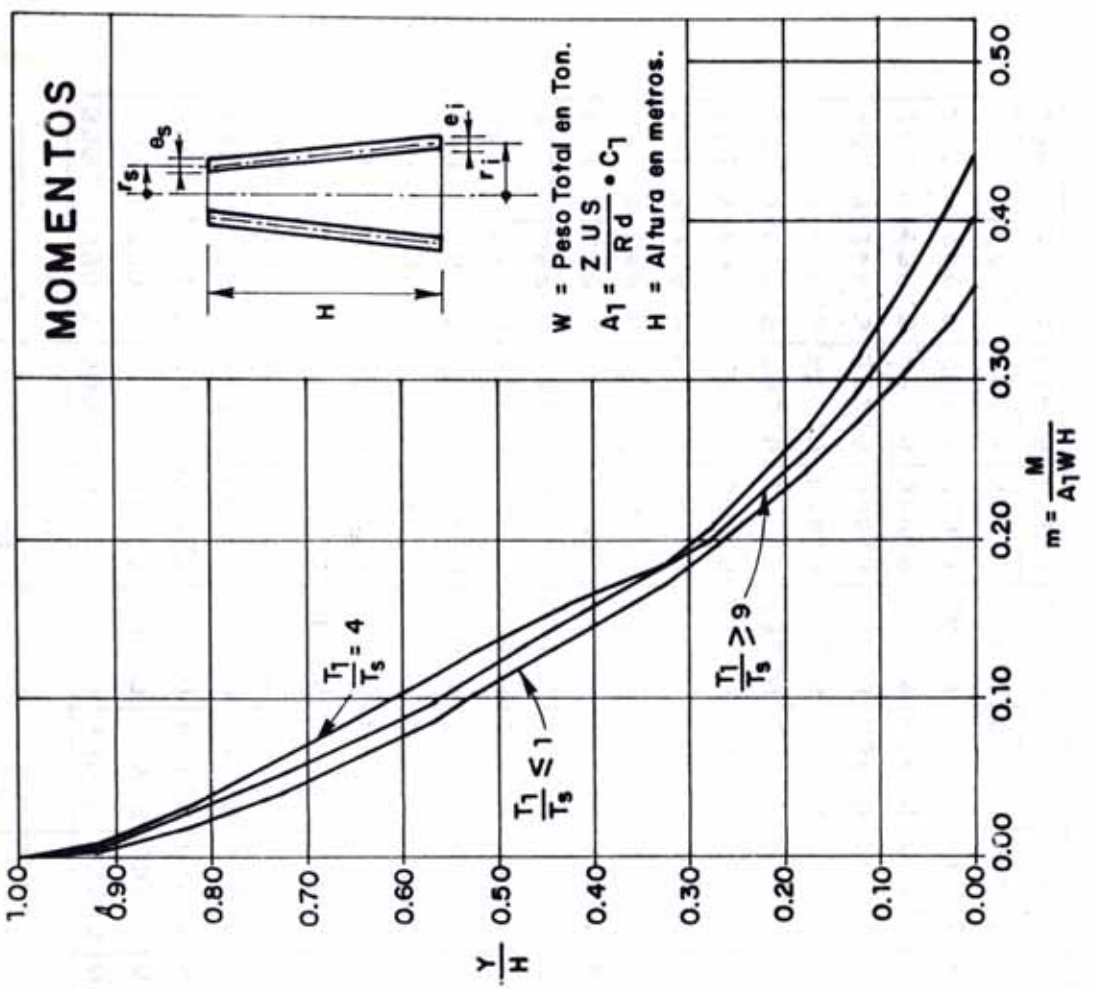
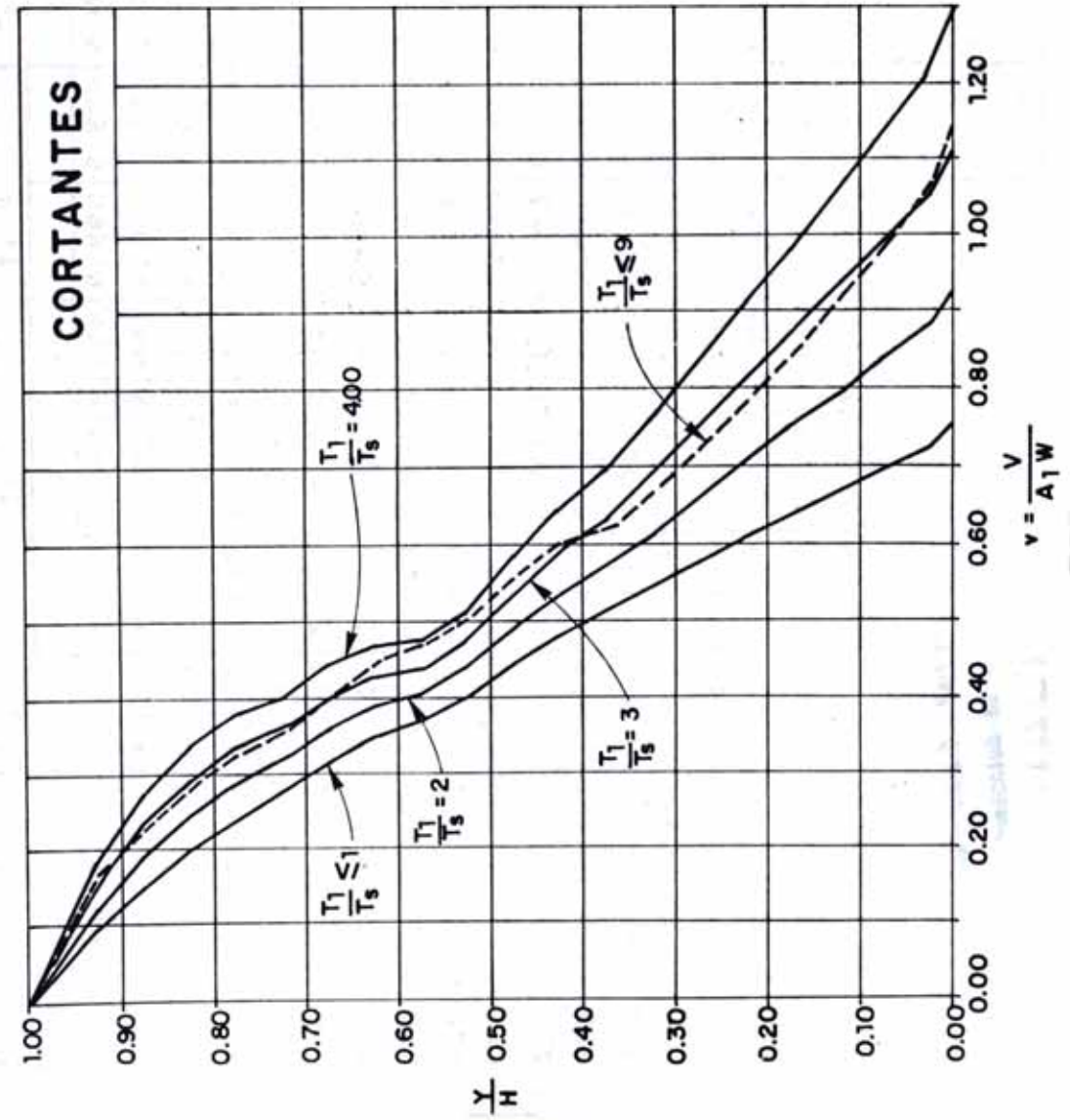
$$\nu = \frac{V}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{H}{A1.H.H}$$

$\frac{y}{H}$	$\frac{T1}{Ts} < 1.00$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$4.0 < \frac{T1}{Ts} < 4.8$		$\frac{T1}{Ts} = 5.00$		$\frac{T1}{Ts} = 7.00$		$\frac{T1}{Ts} = 8.00$		$\frac{T1}{Ts} > 10.00$	
	ν	M	ν	M	ν	M	ν	M	ν	M	ν	M	ν	M	ν	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.039	0.002	0.051	0.003	0.063	0.003	0.075	0.004	0.072	0.004	0.070	0.004	0.069	0.003	0.066	0.003
0.925	0.117	0.006	0.152	0.008	0.188	0.009	0.224	0.011	0.216	0.011	0.211	0.011	0.206	0.010	0.199	0.010
0.875	0.190	0.015	0.235	0.018	0.283	0.023	0.332	0.026	0.317	0.025	0.308	0.024	0.300	0.024	0.288	0.023
0.825	0.247	0.026	0.296	0.032	0.348	0.038	0.402	0.044	0.383	0.042	0.371	0.040	0.361	0.039	0.345	0.037
0.775	0.297	0.039	0.345	0.047	0.397	0.054	0.450	0.062	0.430	0.059	0.418	0.057	0.407	0.056	0.390	0.053
0.725	0.338	0.054	0.384	0.063	0.432	0.072	0.482	0.082	0.463	0.077	0.451	0.075	0.442	0.073	0.426	0.069
0.675	0.378	0.071	0.422	0.080	0.467	0.090	0.514	0.100	0.499	0.096	0.490	0.092	0.482	0.090	0.470	0.086
0.625	0.412	0.089	0.452	0.098	0.493	0.109	0.536	0.120	0.526	0.114	0.519	0.111	0.514	0.108	0.506	0.104
0.575	0.441	0.107	0.477	0.116	0.514	0.127	0.551	0.137	0.547	0.132	0.544	0.129	0.541	0.126	0.538	0.121
0.525	0.455	0.127	0.483	0.136	0.511	0.146	0.540	0.156	0.540	0.151	0.540	0.148	0.540	0.145	0.540	0.141
0.475	0.504	0.148	0.543	0.157	0.583	0.166	0.624	0.176	0.619	0.172	0.615	0.170	0.612	0.167	0.607	0.163
0.425	0.542	0.169	0.589	0.177	0.638	0.186	0.689	0.194	0.677	0.191	0.669	0.188	0.663	0.186	0.653	0.183
0.375	0.573	0.191	0.628	0.198	0.686	0.204	0.746	0.211	0.727	0.209	0.714	0.207	0.704	0.206	0.688	0.204
0.325	0.596	0.212	0.656	0.217	0.720	0.223	0.787	0.228	0.761	0.226	0.744	0.226	0.730	0.225	0.708	0.224
0.275	0.629	0.233	0.702	0.236	0.780	0.240	0.861	0.243	0.828	0.243	0.807	0.242	0.790	0.242	0.762	0.242
0.225	0.654	0.261	0.738	0.265	0.826	0.270	0.913	0.274	0.881	0.273	0.857	0.272	0.836	0.272	0.805	0.271
0.175	0.683	0.290	0.779	0.296	0.882	0.302	0.989	0.308	0.948	0.305	0.920	0.304	0.898	0.302	0.863	0.300
0.125	0.709	0.321	0.819	0.329	0.935	0.338	1.057	0.348	1.013	0.343	0.984	0.340	0.960	0.338	0.923	0.334
0.075	0.735	0.354	0.858	0.367	0.988	0.380	1.123	0.393	1.077	0.387	1.048	0.383	1.023	0.380	0.985	0.374
0.025	0.760	0.390	0.895	0.408	1.038	0.426	1.186	0.446	1.140	0.438	1.110	0.432	1.086	0.428	1.047	0.421
0.000	0.784	0.408	0.931	0.430	1.086	0.452	1.246	0.475	1.201	0.466	1.171	0.459	1.146	0.454	1.108	0.446

**FIG. 29 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES
PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR**

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.25$$

$$\frac{\theta_s}{\theta_i} = 1.00$$



W = Peso Total en Ton.
 $Z = \frac{U S}{R d} \cdot C_1$
 H = Altura en metros.

CUADRO 16: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

rs/ri	0.25
es/ei	1.00

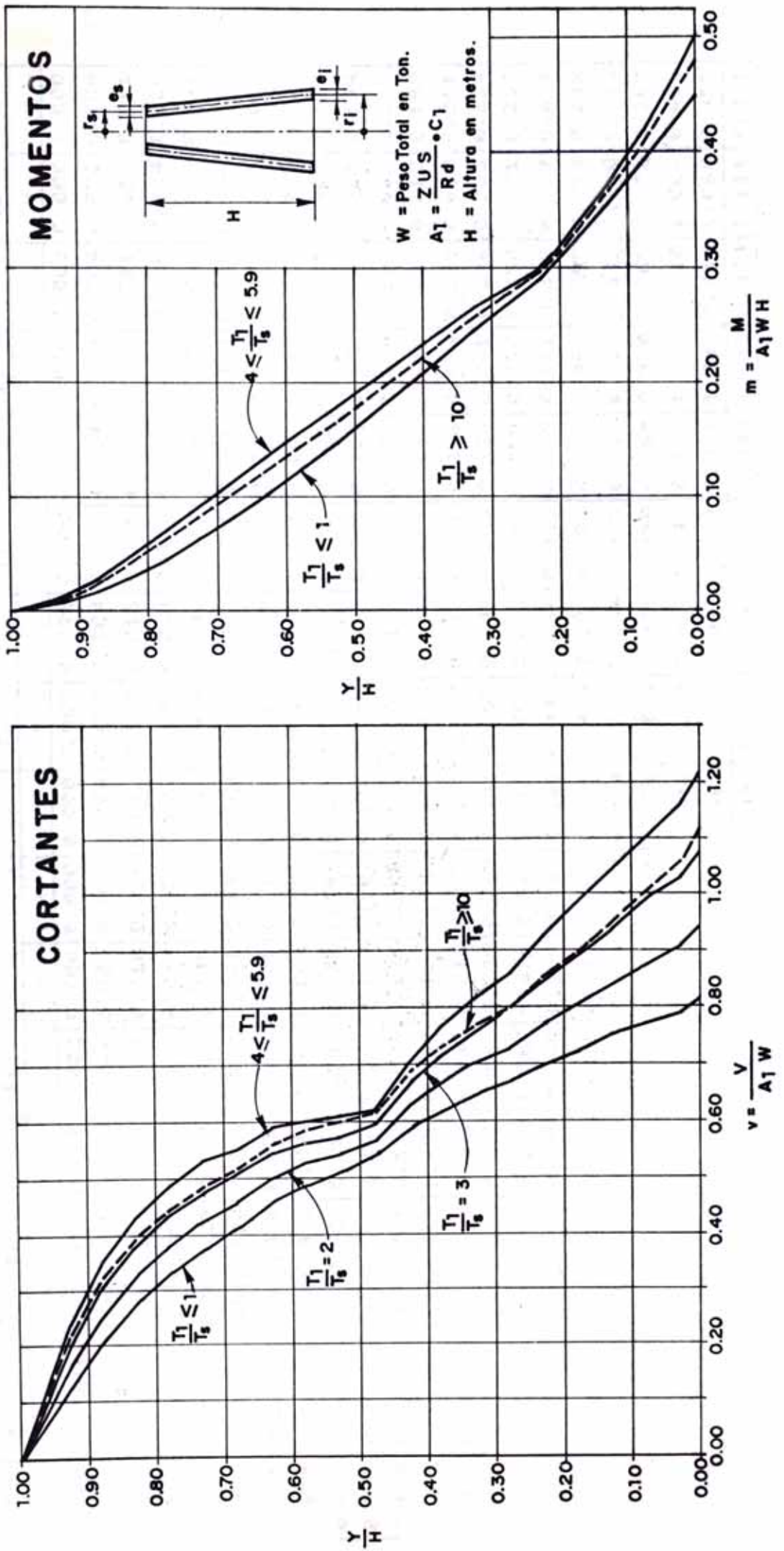
$$v = \frac{V}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{M}{A1.H.H}$$

$\frac{Y}{H}$	$\frac{T1}{Ts} < 1.00$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$\frac{T1}{Ts} = 4.00$		$\frac{T1}{Ts} = 5.00$		$\frac{T1}{Ts} = 6.00$		$\frac{T1}{Ts} = 7.00$		$\frac{T1}{Ts} > 9.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.031	0.002	0.041	0.002	0.052	0.003	0.062	0.003	0.060	0.003	0.058	0.003	0.057	0.003	0.055	0.003
0.925	0.093	0.005	0.124	0.006	0.156	0.008	0.186	0.009	0.180	0.009	0.174	0.009	0.170	0.009	0.164	0.008
0.875	0.150	0.012	0.191	0.015	0.234	0.018	0.274	0.021	0.262	0.021	0.252	0.020	0.244	0.019	0.233	0.018
0.825	0.198	0.020	0.243	0.025	0.290	0.030	0.335	0.035	0.319	0.034	0.306	0.032	0.296	0.031	0.281	0.029
0.775	0.240	0.031	0.285	0.037	0.333	0.044	0.379	0.050	0.362	0.048	0.348	0.046	0.338	0.044	0.322	0.041
0.725	0.274	0.042	0.316	0.050	0.360	0.058	0.402	0.065	0.387	0.062	0.374	0.059	0.365	0.057	0.350	0.053
0.675	0.315	0.056	0.357	0.064	0.401	0.073	0.445	0.081	0.433	0.077	0.424	0.074	0.416	0.071	0.405	0.067
0.625	0.347	0.070	0.387	0.078	0.429	0.087	0.470	0.096	0.463	0.091	0.458	0.088	0.453	0.085	0.446	0.081
0.575	0.369	0.085	0.403	0.093	0.439	0.102	0.475	0.111	0.472	0.106	0.471	0.103	0.469	0.100	0.467	0.096
0.525	0.400	0.103	0.436	0.111	0.473	0.120	0.511	0.129	0.509	0.125	0.508	0.122	0.506	0.119	0.504	0.115
0.475	0.443	0.120	0.488	0.128	0.535	0.136	0.582	0.144	0.574	0.140	0.568	0.138	0.563	0.136	0.556	0.133
0.425	0.479	0.137	0.532	0.144	0.588	0.151	0.643	0.158	0.629	0.156	0.617	0.154	0.608	0.152	0.595	0.150
0.375	0.507	0.155	0.567	0.161	0.631	0.166	0.693	0.172	0.671	0.171	0.654	0.170	0.641	0.169	0.621	0.167
0.325	0.539	0.172	0.611	0.176	0.687	0.180	0.760	0.184	0.732	0.184	0.709	0.184	0.692	0.184	0.665	0.183
0.275	0.573	0.195	0.657	0.200	0.747	0.205	0.834	0.209	0.799	0.208	0.772	0.208	0.751	0.207	0.719	0.206
0.225	0.604	0.220	0.703	0.226	0.807	0.233	0.909	0.239	0.869	0.237	0.839	0.235	0.814	0.234	0.778	0.231
0.175	0.634	0.245	0.747	0.254	0.866	0.263	0.982	0.271	0.939	0.267	0.906	0.264	0.880	0.261	0.841	0.258
0.125	0.664	0.274	0.791	0.286	0.926	0.299	1.057	0.311	1.012	0.305	0.978	0.300	0.950	0.296	0.909	0.291
0.075	0.694	0.305	0.837	0.322	0.988	0.340	1.134	0.357	1.089	0.349	1.053	0.342	1.025	0.337	0.983	0.330
0.025	0.724	0.338	0.882	0.362	1.048	0.386	1.210	0.410	1.164	0.400	1.128	0.392	1.100	0.386	1.058	0.376
0.000	0.752	0.356	0.925	0.383	1.106	0.412	1.283	0.440	1.237	0.428	1.202	0.420	1.173	0.413	1.132	0.402

**FIG. 30 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES
PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR**

$$\frac{r_s}{r_i} = 1.00$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.75$$



CUADRO 17: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

rs/ri	1.00
es/ei	0.75

$$v = \frac{V}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{H}{A1.H.H}$$

Y H	$\frac{T1}{Ts} < 1.00$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$4.0 < \frac{T1}{Ts} < 5.9$		$\frac{T1}{Ts} = 7.00$		$\frac{T1}{Ts} = 8.00$		$\frac{T1}{Ts} = 9.00$		$\frac{T1}{Ts} > 10.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.043	0.002	0.054	0.003	0.066	0.003	0.079	0.004	0.077	0.004	0.075	0.004	0.074	0.004	0.072	0.004
0.925	0.129	0.006	0.163	0.008	0.199	0.010	0.236	0.012	0.230	0.012	0.225	0.011	0.221	0.011	0.217	0.011
0.875	0.212	0.017	0.258	0.020	0.307	0.024	0.358	0.028	0.346	0.028	0.338	0.027	0.330	0.026	0.324	0.026
0.825	0.279	0.030	0.329	0.035	0.383	0.042	0.438	0.048	0.424	0.046	0.413	0.045	0.403	0.044	0.395	0.043
0.775	0.334	0.045	0.384	0.053	0.437	0.061	0.492	0.069	0.476	0.067	0.465	0.065	0.454	0.063	0.446	0.062
0.725	0.382	0.062	0.430	0.071	0.480	0.081	0.533	0.091	0.518	0.088	0.507	0.085	0.497	0.083	0.489	0.082
0.675	0.420	0.081	0.462	0.091	0.507	0.102	0.553	0.113	0.540	0.110	0.531	0.107	0.523	0.104	0.515	0.102
0.625	0.462	0.101	0.502	0.112	0.545	0.123	0.589	0.135	0.579	0.131	0.572	0.128	0.566	0.125	0.561	0.123
0.575	0.491	0.123	0.527	0.134	0.564	0.145	0.601	0.157	0.596	0.153	0.592	0.150	0.588	0.147	0.585	0.144
0.525	0.515	0.145	0.545	0.155	0.576	0.166	0.608	0.178	0.606	0.173	0.605	0.170	0.604	0.167	0.603	0.165
0.475	0.538	0.169	0.565	0.178	0.593	0.188	0.622	0.199	0.620	0.195	0.619	0.192	0.618	0.189	0.617	0.187
0.425	0.586	0.193	0.626	0.202	0.667	0.212	0.709	0.222	0.703	0.218	0.698	0.216	0.694	0.213	0.690	0.211
0.375	0.620	0.218	0.668	0.226	0.717	0.234	0.768	0.242	0.757	0.240	0.748	0.238	0.741	0.236	0.735	0.234
0.325	0.648	0.243	0.703	0.249	0.760	0.256	0.820	0.263	0.803	0.261	0.791	0.259	0.780	0.258	0.771	0.257
0.275	0.670	0.267	0.731	0.272	0.795	0.277	0.862	0.281	0.841	0.280	0.825	0.279	0.811	0.279	0.799	0.278
0.225	0.700	0.292	0.773	0.294	0.850	0.296	0.931	0.299	0.905	0.299	0.885	0.299	0.868	0.298	0.854	0.298
0.175	0.723	0.323	0.806	0.327	0.894	0.330	0.987	0.334	0.958	0.334	0.935	0.333	0.917	0.332	0.900	0.332
0.125	0.747	0.356	0.841	0.361	0.941	0.367	1.045	0.373	1.014	0.371	0.990	0.369	0.970	0.368	0.952	0.367
0.075	0.769	0.391	0.875	0.400	0.986	0.409	1.103	0.418	1.070	0.415	1.045	0.412	1.024	0.410	1.006	0.408
0.025	0.791	0.428	0.907	0.442	1.030	0.455	1.157	0.469	1.124	0.465	1.099	0.461	1.080	0.458	1.060	0.455
0.000	0.811	0.448	0.938	0.464	1.071	0.481	1.209	0.498	1.176	0.492	1.151	0.488	1.129	0.484	1.111	0.481

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.75$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.75$$

FIG. 31 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

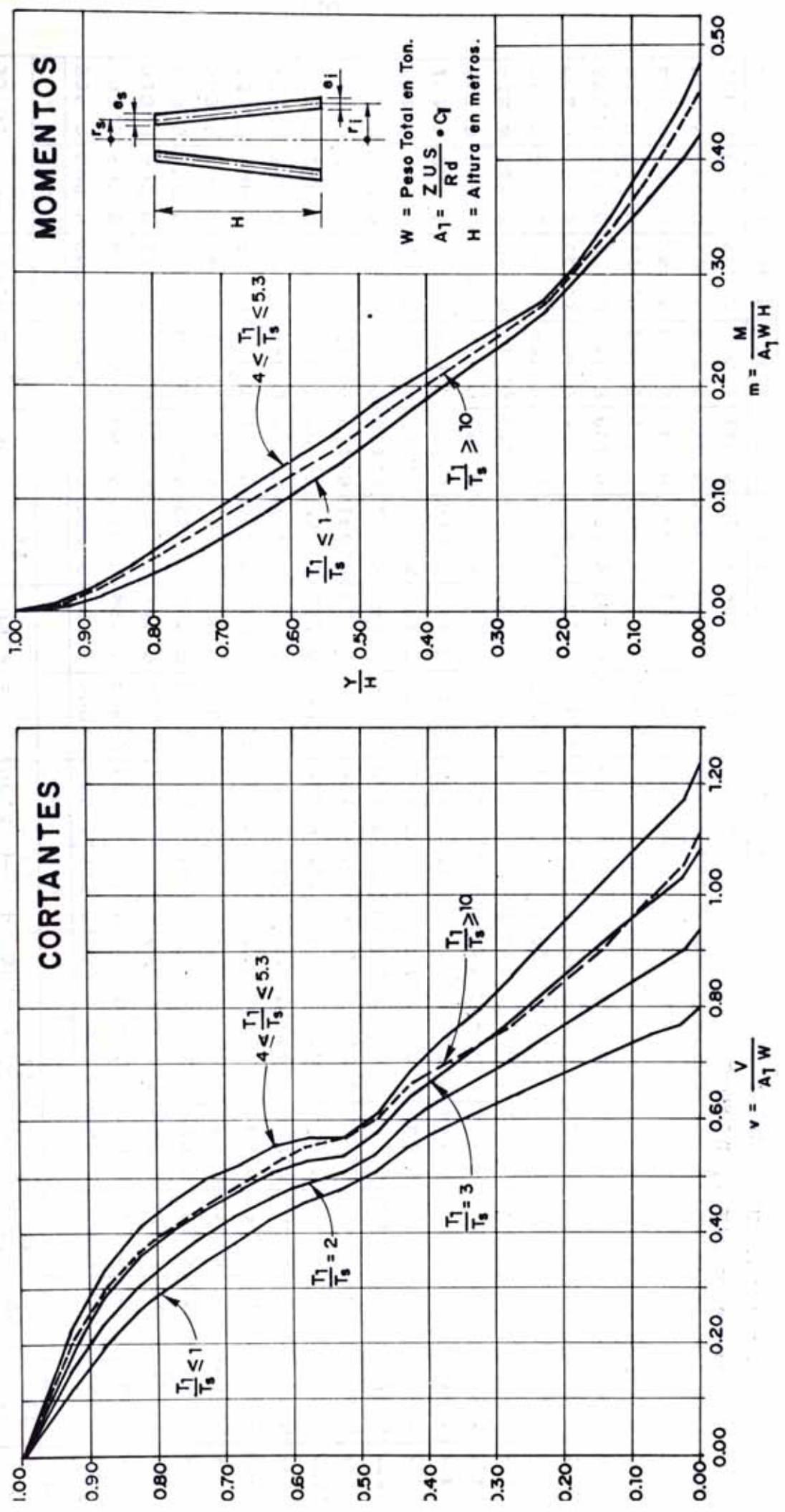
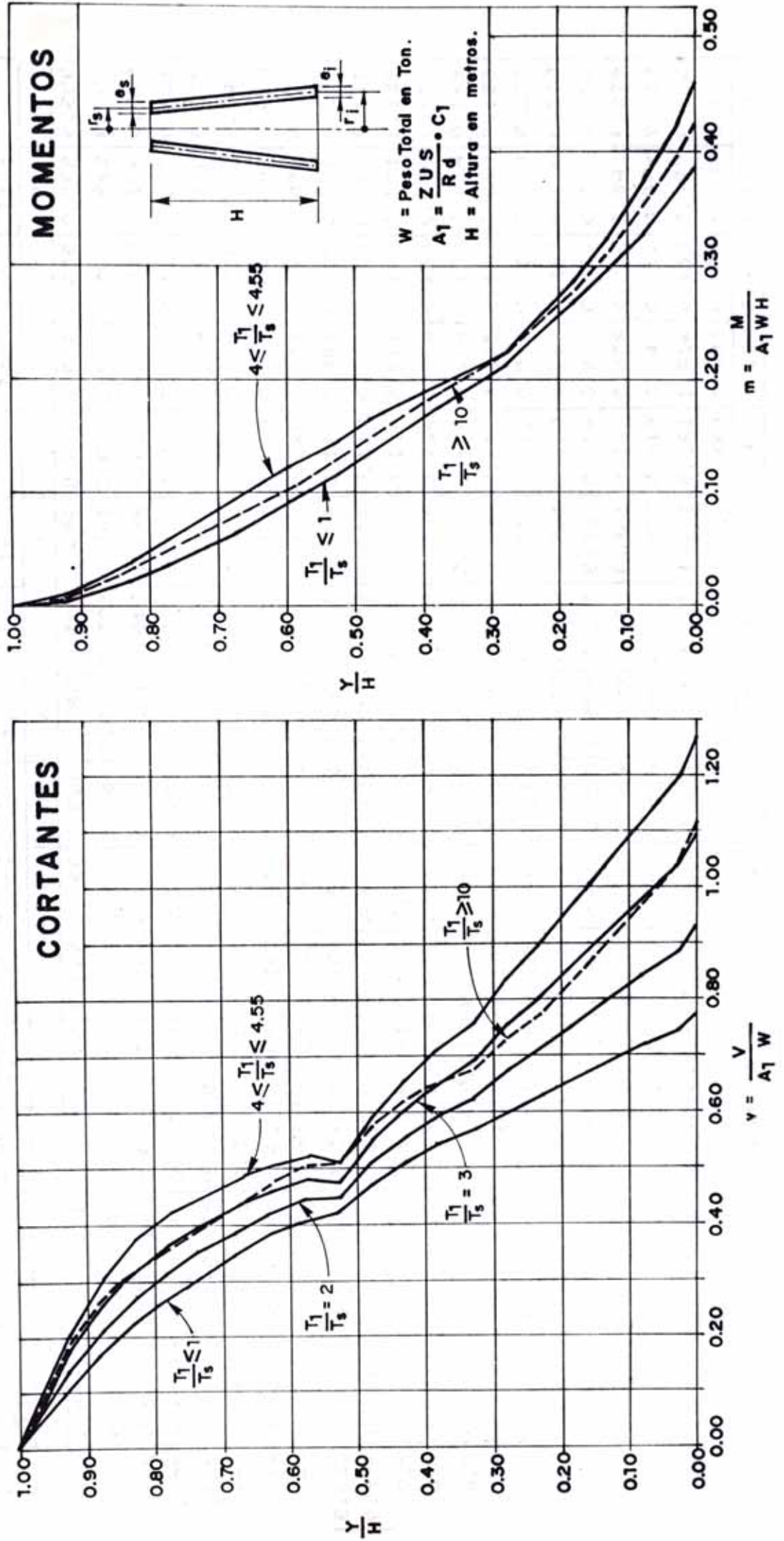


FIG. 32 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.50$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.75$$



CUADRO 19: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.50
e_s/e_i	0.75

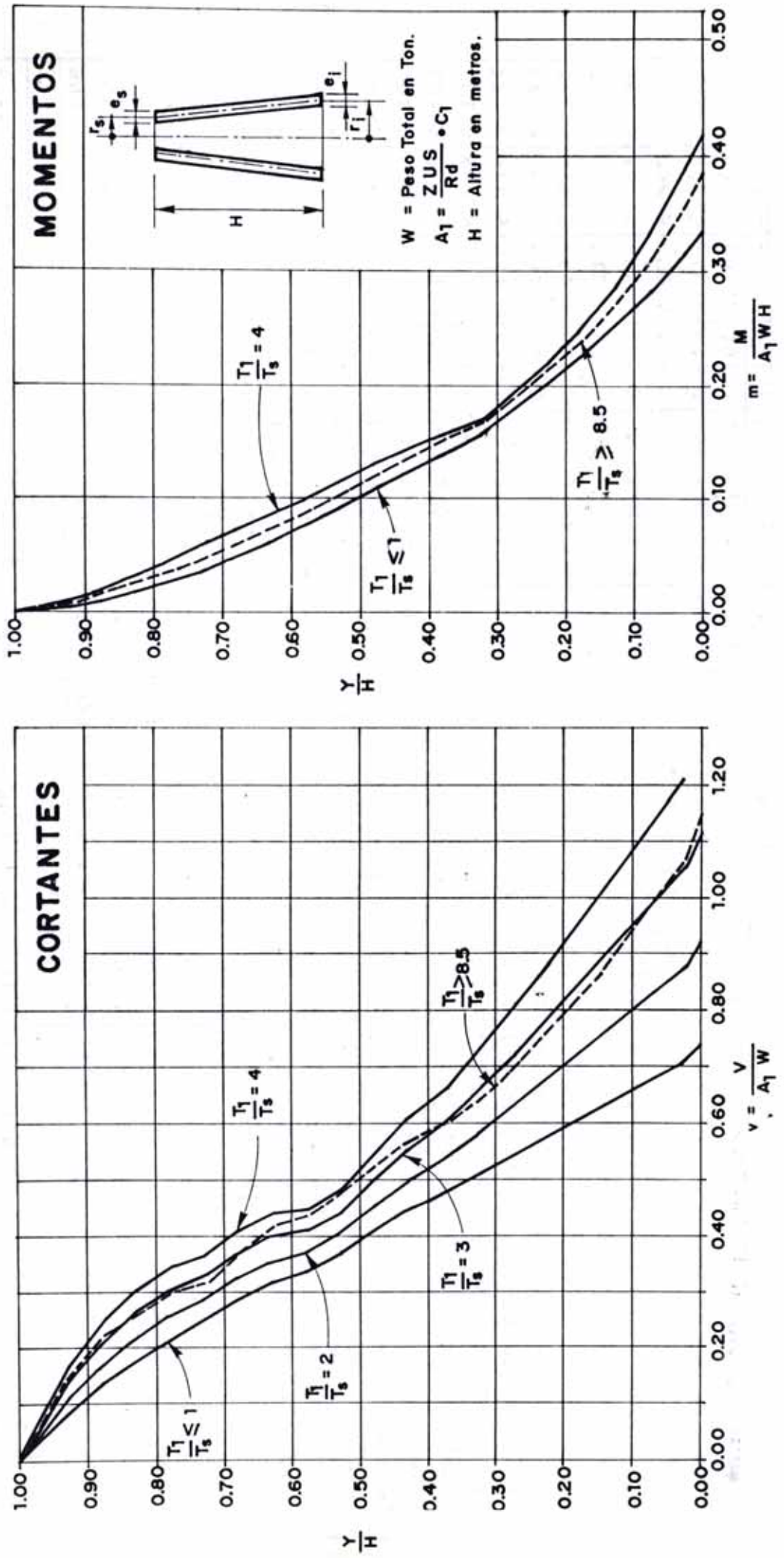
$$v = \frac{U}{A_1.H} \quad , \quad M = \frac{H}{A_1.H.H}$$

$\frac{v}{H}$	$\frac{T_1}{T_s} < 1.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 2.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 3.00$		$\frac{T_1}{T_s} < 4.55$		$\frac{T_1}{T_s} = 6.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 7.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 8.00$		$\frac{T_1}{T_s} > 10.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.036	0.002	0.047	0.002	0.059	0.003	0.070	0.004	0.067	0.003	0.065	0.003	0.064	0.003	0.062	0.003
0.925	0.108	0.005	0.141	0.007	0.176	0.009	0.210	0.011	0.201	0.010	0.196	0.010	0.192	0.010	0.186	0.009
0.875	0.174	0.014	0.218	0.017	0.264	0.021	0.312	0.025	0.295	0.023	0.286	0.023	0.278	0.022	0.267	0.021
0.825	0.227	0.024	0.275	0.029	0.325	0.035	0.377	0.041	0.355	0.038	0.344	0.037	0.334	0.036	0.320	0.035
0.775	0.273	0.036	0.321	0.043	0.371	0.051	0.424	0.058	0.400	0.055	0.388	0.053	0.378	0.051	0.362	0.049
0.725	0.312	0.050	0.357	0.058	0.405	0.067	0.454	0.076	0.432	0.071	0.421	0.069	0.411	0.067	0.397	0.064
0.675	0.350	0.065	0.393	0.074	0.439	0.083	0.486	0.094	0.468	0.088	0.458	0.085	0.451	0.082	0.439	0.079
0.625	0.383	0.081	0.423	0.091	0.465	0.101	0.508	0.112	0.495	0.105	0.489	0.102	0.484	0.099	0.476	0.095
0.575	0.411	0.098	0.448	0.107	0.485	0.117	0.524	0.128	0.518	0.121	0.515	0.118	0.513	0.115	0.509	0.111
0.525	0.424	0.116	0.452	0.125	0.481	0.135	0.511	0.145	0.511	0.139	0.511	0.136	0.511	0.133	0.511	0.129
0.475	0.473	0.136	0.513	0.145	0.554	0.154	0.596	0.164	0.590	0.159	0.586	0.156	0.584	0.154	0.579	0.150
0.425	0.511	0.156	0.560	0.164	0.610	0.172	0.663	0.180	0.648	0.176	0.640	0.174	0.634	0.172	0.624	0.169
0.375	0.543	0.176	0.600	0.182	0.660	0.189	0.721	0.196	0.697	0.193	0.685	0.192	0.675	0.190	0.659	0.188
0.325	0.567	0.195	0.630	0.200	0.696	0.206	0.765	0.211	0.732	0.209	0.715	0.209	0.701	0.208	0.679	0.207
0.275	0.602	0.215	0.678	0.218	0.759	0.221	0.844	0.224	0.802	0.224	0.781	0.224	0.763	0.224	0.736	0.224
0.225	0.629	0.242	0.716	0.247	0.809	0.251	0.906	0.256	0.858	0.255	0.833	0.254	0.813	0.253	0.781	0.252
0.175	0.660	0.269	0.761	0.275	0.869	0.282	0.982	0.289	0.929	0.285	0.901	0.283	0.878	0.282	0.843	0.279
0.125	0.689	0.299	0.805	0.308	0.928	0.318	1.056	0.328	0.999	0.322	0.970	0.319	0.946	0.316	0.909	0.313
0.075	0.717	0.331	0.848	0.344	0.985	0.359	1.128	0.373	1.071	0.365	1.040	0.361	1.016	0.357	0.977	0.352
0.025	0.745	0.366	0.889	0.385	1.042	0.405	1.199	0.426	1.141	0.415	1.110	0.409	1.085	0.405	1.047	0.397
0.000	0.771	0.384	0.930	0.407	1.096	0.430	1.267	0.455	1.209	0.443	1.178	0.437	1.154	0.431	1.115	0.423

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.25$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.75$$

FIG. 33 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR



CUADRO 20: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.25
e_s/e_i	0.75

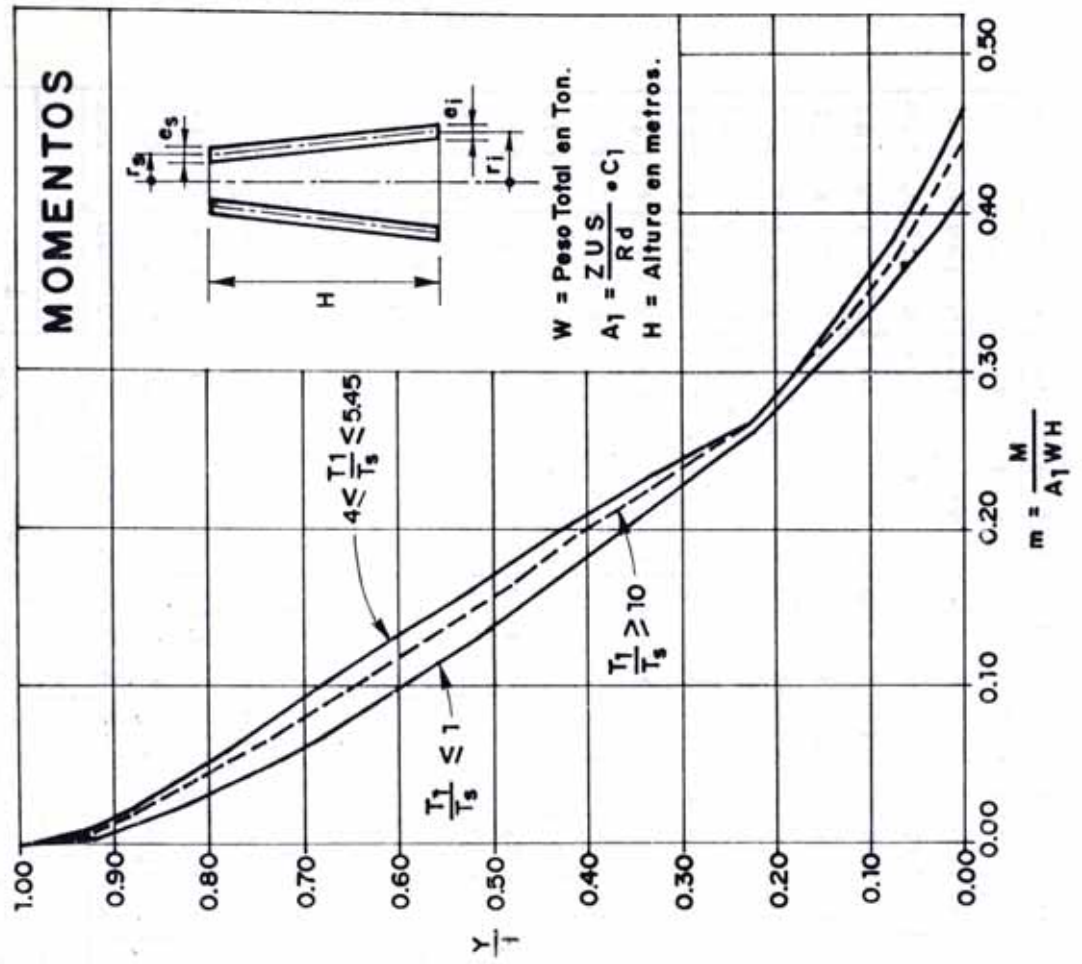
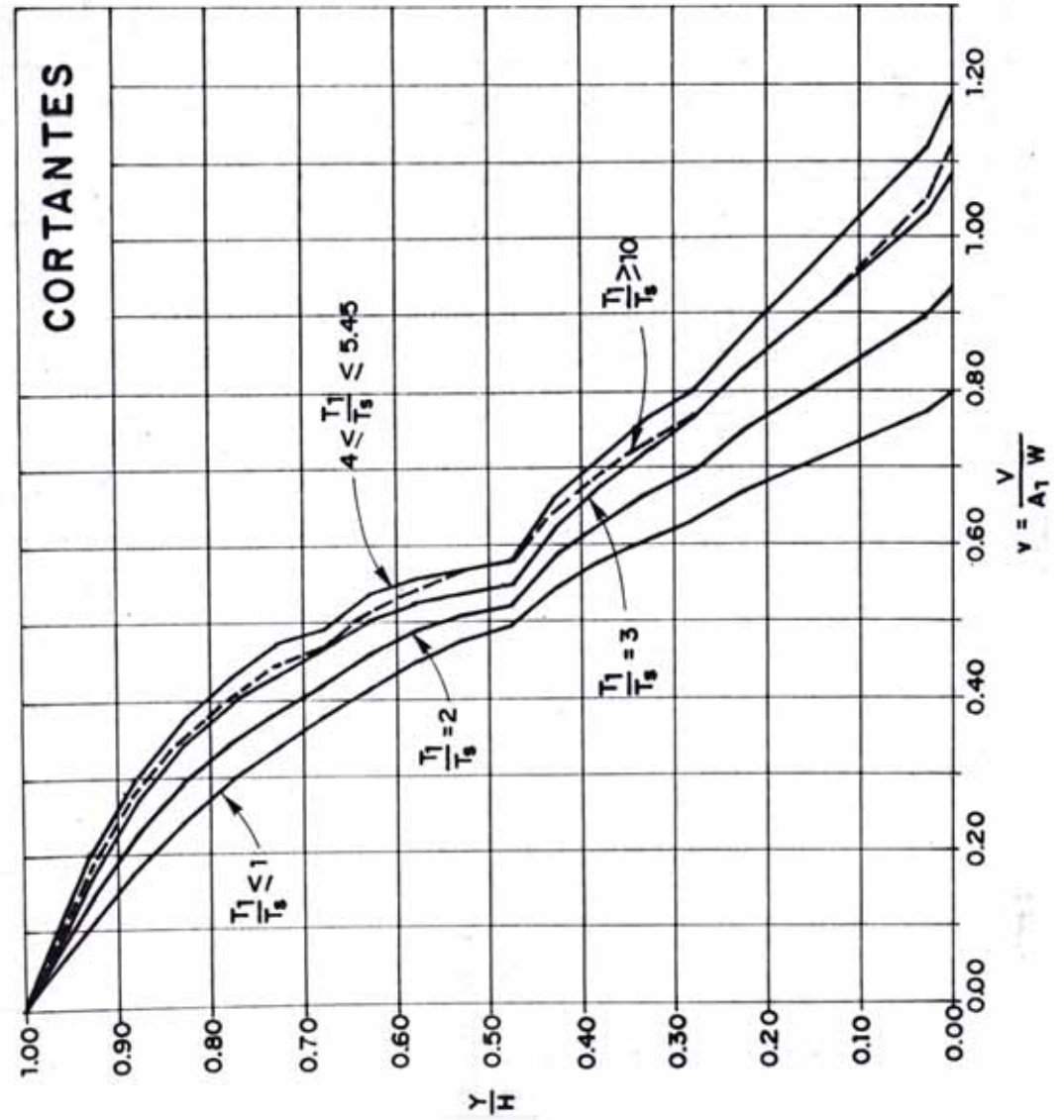
$$v = \frac{U}{A_1.H} \quad , \quad m = \frac{H}{A_1.H.H}$$

$\frac{y}{H}$	$\frac{T_1}{T_s} < 1.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 2.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 3.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 4.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 5.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 6.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 7.00$		$\frac{T_1}{T_s} > 8.50$	
	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.029	0.001	0.038	0.002	0.048	0.002	0.057	0.003	0.055	0.003	0.054	0.003	0.052	0.003	0.051	0.003
0.925	0.086	0.004	0.115	0.006	0.144	0.007	0.172	0.009	0.166	0.008	0.161	0.008	0.157	0.008	0.153	0.008
0.875	0.137	0.011	0.176	0.014	0.216	0.017	0.252	0.020	0.241	0.019	0.232	0.018	0.225	0.018	0.217	0.017
0.825	0.181	0.019	0.224	0.023	0.268	0.023	0.308	0.032	0.293	0.031	0.281	0.029	0.272	0.028	0.261	0.027
0.775	0.220	0.028	0.263	0.034	0.309	0.040	0.350	0.046	0.334	0.043	0.321	0.042	0.311	0.040	0.299	0.038
0.725	0.251	0.038	0.291	0.045	0.334	0.053	0.372	0.059	0.358	0.056	0.346	0.054	0.337	0.051	0.326	0.049
0.675	0.290	0.051	0.331	0.058	0.375	0.067	0.415	0.074	0.403	0.070	0.395	0.067	0.388	0.065	0.379	0.062
0.625	0.321	0.063	0.360	0.071	0.402	0.080	0.442	0.087	0.435	0.083	0.429	0.080	0.425	0.077	0.420	0.074
0.575	0.341	0.077	0.376	0.085	0.412	0.094	0.447	0.101	0.445	0.097	0.443	0.094	0.442	0.091	0.440	0.089
0.525	0.372	0.093	0.409	0.102	0.446	0.110	0.484	0.118	0.482	0.114	0.481	0.111	0.479	0.109	0.478	0.106
0.475	0.414	0.109	0.460	0.117	0.508	0.125	0.554	0.132	0.546	0.129	0.540	0.126	0.535	0.124	0.530	0.122
0.425	0.450	0.125	0.504	0.132	0.561	0.139	0.614	0.145	0.600	0.143	0.589	0.141	0.580	0.140	0.569	0.138
0.375	0.478	0.141	0.540	0.147	0.605	0.153	0.663	0.158	0.642	0.157	0.625	0.156	0.612	0.155	0.596	0.154
0.325	0.512	0.157	0.586	0.161	0.663	0.165	0.733	0.169	0.704	0.160	0.682	0.169	0.664	0.169	0.644	0.169
0.275	0.546	0.179	0.634	0.185	0.726	0.190	0.808	0.195	0.773	0.194	0.746	0.193	0.725	0.192	0.700	0.191
0.225	0.580	0.203	0.682	0.210	0.790	0.217	0.886	0.223	0.847	0.220	0.816	0.218	0.792	0.217	0.764	0.215
0.175	0.612	0.227	0.729	0.236	0.853	0.246	0.964	0.254	0.921	0.249	0.888	0.246	0.861	0.244	0.831	0.240
0.125	0.644	0.254	0.777	0.267	0.918	0.281	1.045	0.292	1.000	0.286	0.965	0.281	0.937	0.277	0.905	0.273
0.075	0.677	0.284	0.827	0.302	0.985	0.321	1.128	0.337	1.083	0.329	1.047	0.322	1.019	0.317	0.986	0.311
0.025	0.709	0.317	0.876	0.341	1.051	0.367	1.212	0.390	1.165	0.380	1.130	0.372	1.101	0.365	1.069	0.358
0.000	0.741	0.334	0.924	0.363	1.116	0.393	1.293	0.420	1.247	0.408	1.211	0.399	1.183	0.392	1.151	0.384

FIG. 34 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

$$\frac{r_s}{r_i} = 1.00$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.50$$



CUADRO 21: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	1.00
e_s/e_i	0.50

$$M = \frac{V}{A_1 H S} \cdot \frac{H}{A_1 H H}$$

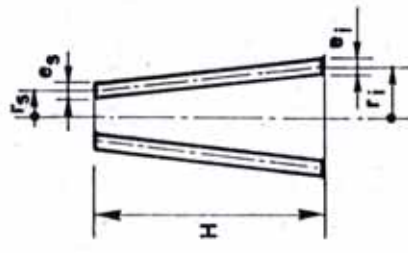
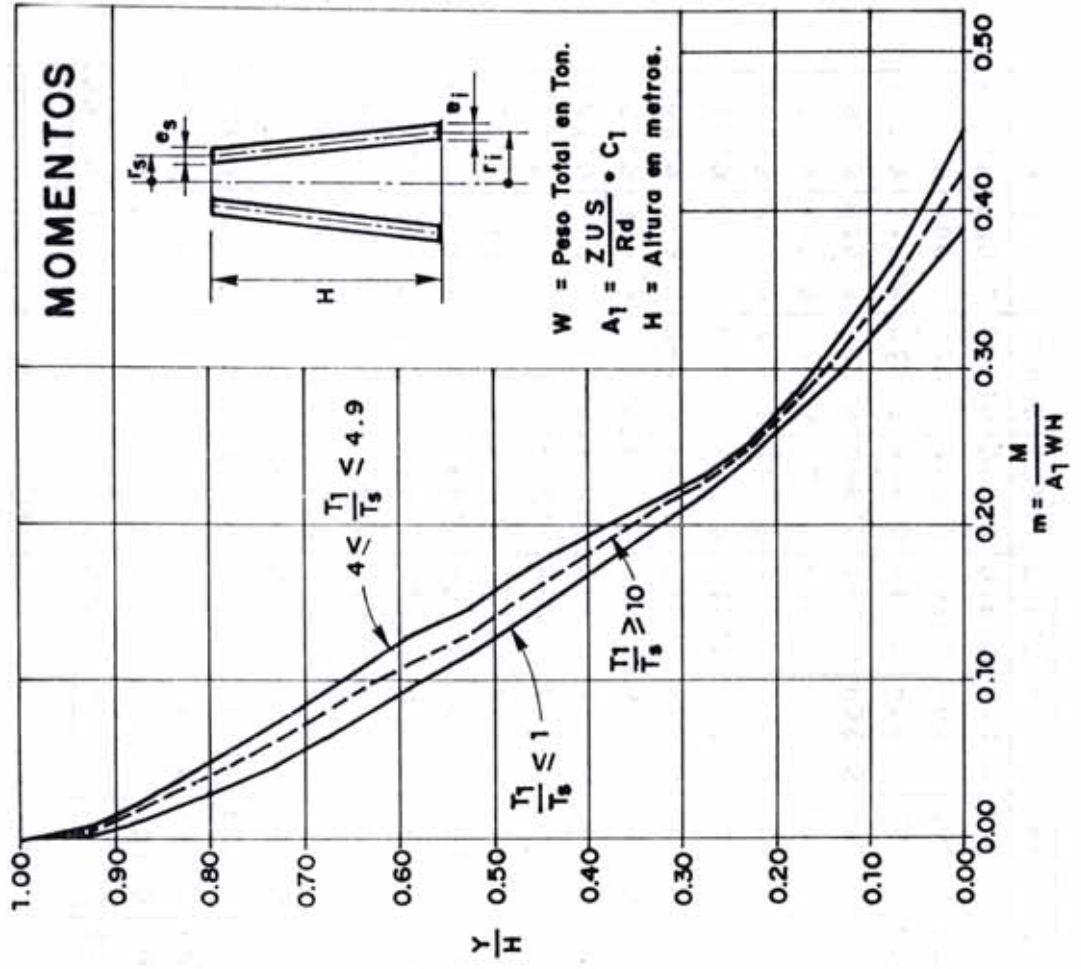
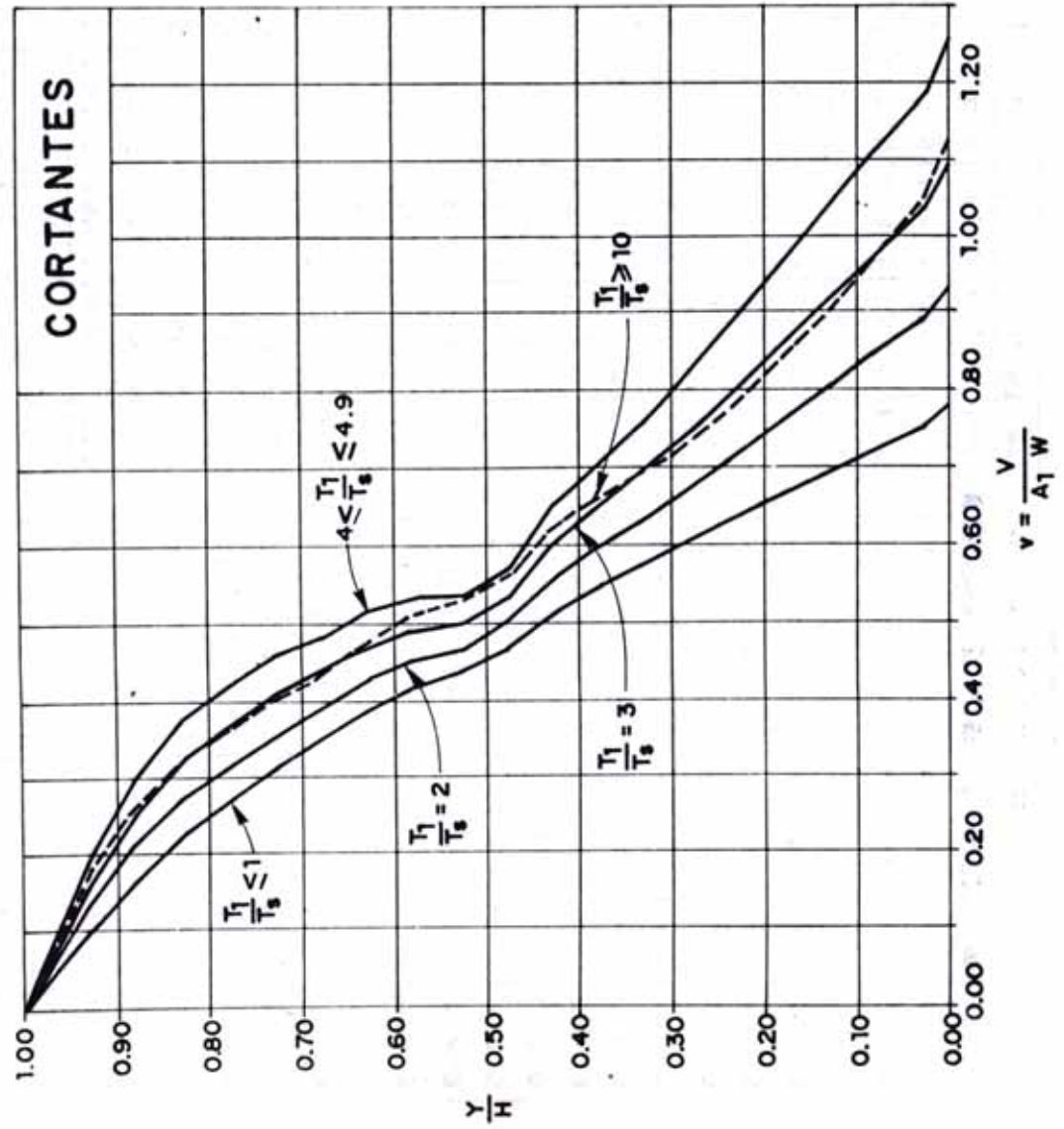
FIG. 21

y - H	$\frac{T_1}{T_s} < 1.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 2.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 3.00$		$4 < \frac{T_1}{T_s} < 5.45$		$\frac{T_1}{T_s} = 7.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 8.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 9.00$		$\frac{T_1}{T_s} > 10.00$	
	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.038	0.002	0.049	0.002	0.060	0.003	0.072	0.004	0.069	0.003	0.067	0.003	0.066	0.003	0.065	0.003
0.925	0.114	0.006	0.147	0.007	0.181	0.009	0.215	0.011	0.207	0.010	0.201	0.010	0.199	0.010	0.196	0.010
0.875	0.187	0.015	0.232	0.018	0.279	0.022	0.327	0.026	0.312	0.025	0.304	0.024	0.297	0.024	0.292	0.023
0.825	0.247	0.026	0.297	0.032	0.349	0.038	0.403	0.044	0.383	0.042	0.373	0.040	0.364	0.039	0.357	0.039
0.775	0.298	0.040	0.348	0.047	0.400	0.055	0.455	0.063	0.433	0.060	0.422	0.058	0.412	0.057	0.404	0.055
0.725	0.343	0.055	0.391	0.064	0.442	0.073	0.495	0.083	0.474	0.079	0.463	0.076	0.453	0.075	0.445	0.073
0.675	0.379	0.072	0.422	0.082	0.467	0.093	0.514	0.104	0.495	0.098	0.486	0.096	0.478	0.093	0.471	0.091
0.625	0.420	0.090	0.462	0.101	0.506	0.112	0.551	0.124	0.537	0.118	0.530	0.115	0.524	0.112	0.519	0.110
0.575	0.450	0.110	0.488	0.120	0.526	0.132	0.566	0.144	0.557	0.138	0.553	0.134	0.549	0.132	0.546	0.129
0.525	0.475	0.130	0.507	0.140	0.541	0.151	0.575	0.162	0.572	0.156	0.570	0.153	0.569	0.150	0.568	0.148
0.475	0.495	0.151	0.523	0.161	0.552	0.171	0.582	0.182	0.580	0.176	0.578	0.173	0.578	0.170	0.577	0.168
0.425	0.546	0.174	0.587	0.183	0.629	0.193	0.672	0.203	0.664	0.198	0.659	0.195	0.656	0.193	0.652	0.191
0.375	0.582	0.196	0.631	0.204	0.683	0.213	0.736	0.221	0.719	0.217	0.711	0.215	0.704	0.213	0.698	0.212
0.325	0.612	0.219	0.669	0.226	0.729	0.233	0.792	0.239	0.767	0.237	0.755	0.235	0.744	0.234	0.735	0.233
0.275	0.636	0.242	0.700	0.246	0.768	0.251	0.839	0.256	0.806	0.254	0.790	0.254	0.776	0.253	0.764	0.253
0.225	0.669	0.264	0.746	0.266	0.828	0.269	0.914	0.271	0.875	0.271	0.855	0.271	0.838	0.271	0.823	0.271
0.175	0.695	0.294	0.784	0.298	0.879	0.303	0.978	0.307	0.933	0.305	0.910	0.305	0.891	0.304	0.874	0.303
0.125	0.722	0.325	0.823	0.331	0.931	0.337	1.044	0.344	0.996	0.341	0.971	0.339	0.950	0.337	0.932	0.336
0.075	0.748	0.359	0.862	0.368	0.984	0.378	1.110	0.388	1.060	0.383	1.034	0.380	1.012	0.378	0.994	0.376
0.025	0.772	0.395	0.900	0.410	1.034	0.425	1.174	0.440	1.123	0.433	1.096	0.429	1.074	0.425	1.055	0.423
0.000	0.796	0.414	0.935	0.432	1.082	0.450	1.234	0.468	1.183	0.460	1.157	0.455	1.135	0.452	1.116	0.449

**FIG. 35 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES
PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR**

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.75$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.50$$



CUADRO 22: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

$$v = \frac{V}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{M}{A1.H.H}$$

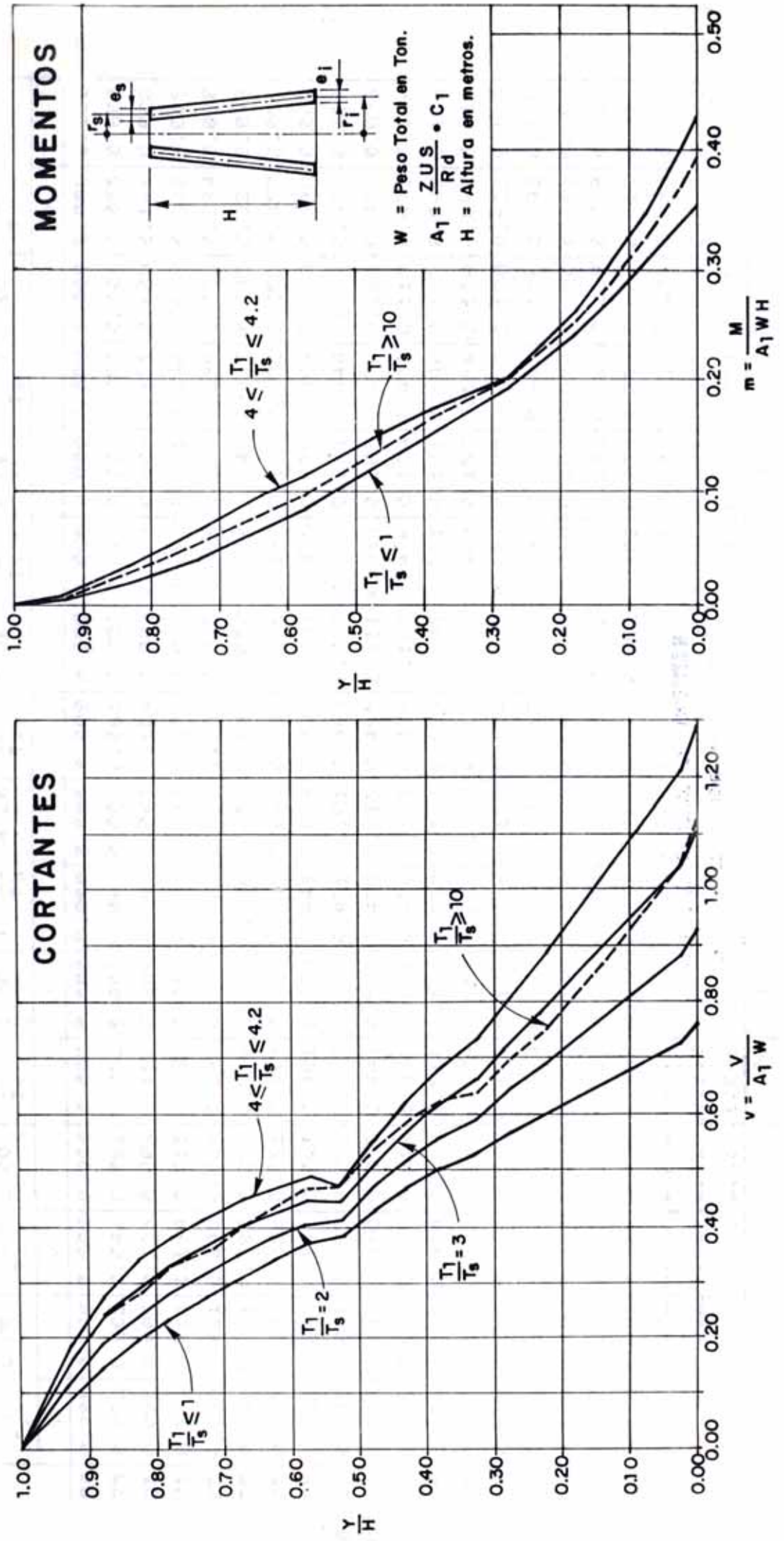
r_s/r_i	0.75
e_s/e_i	0.50

y H	$\frac{T1}{Ts} < 1$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$4 < \frac{T1}{Ts} < 4.90$		$\frac{T1}{Ts} = 6.00$		$\frac{T1}{Ts} = 7.00$		$\frac{T1}{Ts} = 8.00$		$\frac{T1}{Ts} > 10.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.035	0.002	0.046	0.002	0.057	0.003	0.069	0.003	0.066	0.003	0.065	0.003	0.064	0.003	0.061	0.003
0.925	0.106	0.005	0.139	0.007	0.173	0.009	0.206	0.010	0.199	0.010	0.194	0.010	0.191	0.010	0.184	0.009
0.875	0.173	0.013	0.217	0.017	0.263	0.021	0.310	0.024	0.297	0.024	0.289	0.023	0.281	0.022	0.270	0.021
0.825	0.238	0.024	0.276	0.029	0.327	0.035	0.379	0.041	0.363	0.039	0.351	0.038	0.342	0.037	0.327	0.035
0.775	0.273	0.036	0.321	0.043	0.372	0.051	0.425	0.059	0.407	0.056	0.394	0.054	0.383	0.053	0.367	0.050
0.725	0.315	0.050	0.362	0.059	0.412	0.068	0.463	0.077	0.446	0.074	0.434	0.071	0.423	0.069	0.407	0.066
0.675	0.351	0.065	0.394	0.075	0.439	0.085	0.486	0.095	0.471	0.091	0.460	0.088	0.452	0.085	0.438	0.082
0.625	0.388	0.082	0.430	0.092	0.473	0.103	0.518	0.114	0.507	0.109	0.500	0.106	0.493	0.103	0.483	0.099
0.575	0.417	0.100	0.455	0.110	0.494	0.121	0.534	0.132	0.528	0.127	0.524	0.123	0.520	0.120	0.515	0.116
0.525	0.438	0.117	0.470	0.127	0.503	0.136	0.537	0.147	0.536	0.142	0.535	0.139	0.534	0.136	0.532	0.131
0.475	0.470	0.138	0.504	0.147	0.540	0.157	0.576	0.168	0.573	0.163	0.571	0.160	0.569	0.157	0.566	0.153
0.425	0.515	0.158	0.560	0.167	0.607	0.176	0.654	0.186	0.646	0.182	0.640	0.179	0.634	0.177	0.626	0.173
0.375	0.548	0.179	0.602	0.186	0.657	0.194	0.714	0.201	0.700	0.199	0.688	0.197	0.679	0.195	0.664	0.192
0.325	0.579	0.200	0.639	0.206	0.703	0.212	0.770	0.218	0.748	0.216	0.732	0.215	0.719	0.214	0.698	0.212
0.275	0.607	0.220	0.678	0.224	0.753	0.228	0.832	0.232	0.803	0.231	0.782	0.231	0.765	0.231	0.738	0.230
0.225	0.638	0.244	0.721	0.247	0.810	0.251	0.903	0.254	0.868	0.254	0.843	0.254	0.823	0.253	0.791	0.253
0.175	0.668	0.272	0.765	0.277	0.868	0.283	0.976	0.288	0.937	0.286	0.909	0.285	0.886	0.284	0.850	0.282
0.125	0.695	0.302	0.806	0.309	0.924	0.317	1.046	0.326	1.004	0.322	0.974	0.319	0.949	0.317	0.911	0.314
0.075	0.725	0.334	0.850	0.345	0.983	0.358	1.121	0.370	1.077	0.365	1.046	0.361	1.021	0.358	0.981	0.353
0.025	0.752	0.369	0.892	0.386	1.040	0.404	1.191	0.422	1.147	0.415	1.116	0.410	1.090	0.405	1.050	0.399
0.000	0.779	0.388	0.932	0.408	1.093	0.429	1.259	0.451	1.215	0.443	1.184	0.437	1.158	0.432	1.118	0.424

**FIG. 36 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES
PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR**

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.50$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.50$$



CUADRO 23: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.50
e_s/e_i	0.50

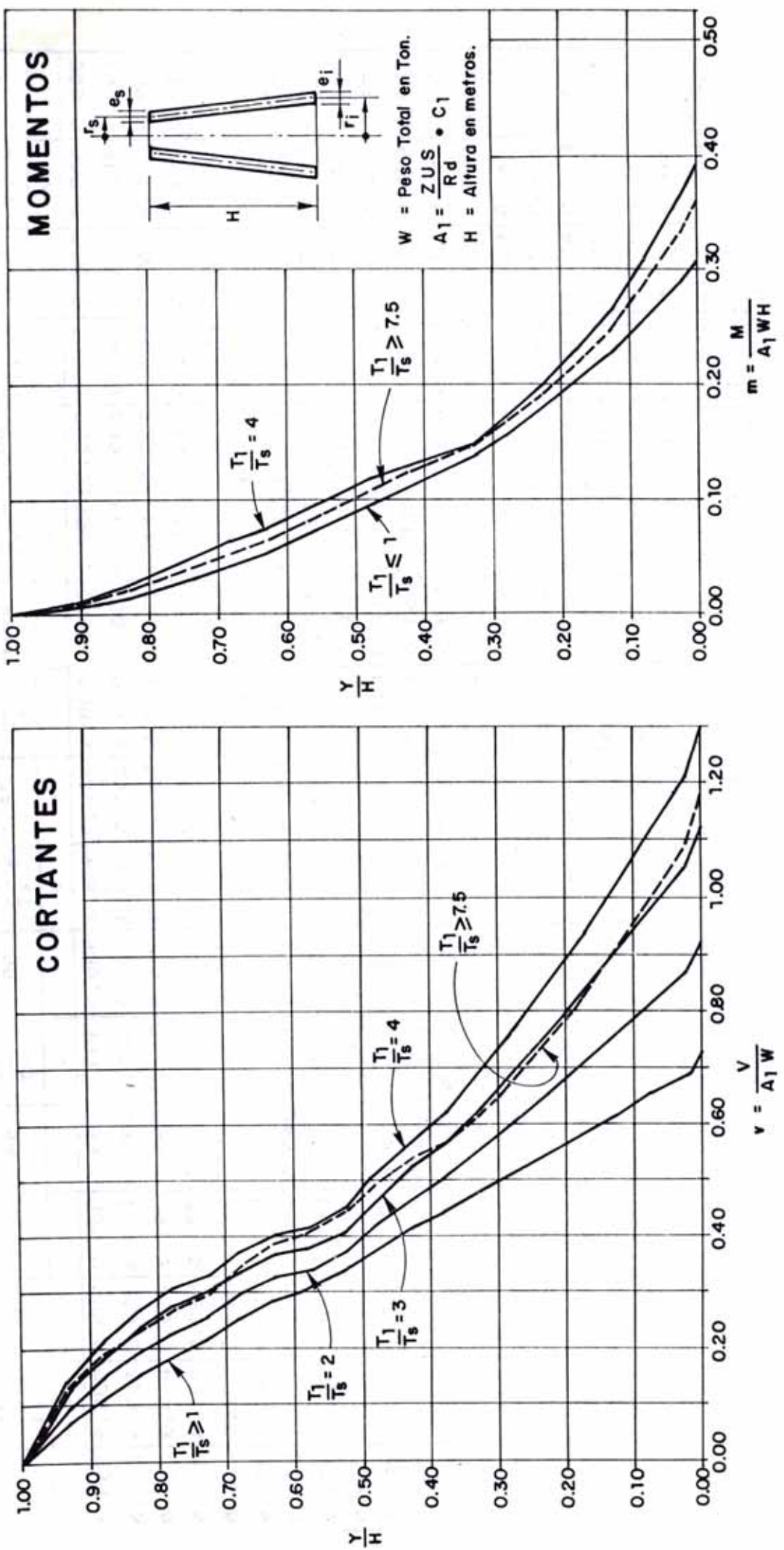
$$M = \frac{H}{A1.H.H}$$

$\frac{y}{H}$	$\frac{T1}{Ts} < 1.00$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$4 < \frac{T1}{Ts} < 4.20$		$\frac{T1}{Ts} = 5.00$		$\frac{T1}{Ts} = 6.00$		$\frac{T1}{Ts} = 8.00$		$\frac{T1}{Ts} > 10.00$	
	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.032	0.002	0.042	0.002	0.052	0.003	0.063	0.003	0.061	0.003	0.060	0.003	0.057	0.003	0.055	0.003
0.925	0.095	0.005	0.125	0.006	0.157	0.008	0.189	0.009	0.184	0.009	0.179	0.009	0.171	0.009	0.166	0.008
0.875	0.153	0.012	0.194	0.015	0.237	0.019	0.281	0.022	0.272	0.021	0.262	0.021	0.248	0.020	0.238	0.019
0.825	0.199	0.021	0.245	0.026	0.293	0.031	0.342	0.037	0.329	0.035	0.316	0.034	0.298	0.032	0.284	0.030
0.775	0.241	0.031	0.287	0.038	0.336	0.045	0.386	0.052	0.373	0.050	0.358	0.048	0.337	0.045	0.323	0.043
0.725	0.277	0.043	0.322	0.051	0.369	0.060	0.417	0.068	0.404	0.066	0.390	0.063	0.371	0.059	0.357	0.056
0.675	0.313	0.057	0.356	0.065	0.401	0.074	0.448	0.084	0.437	0.081	0.425	0.078	0.409	0.072	0.398	0.069
0.625	0.345	0.071	0.385	0.080	0.427	0.090	0.471	0.101	0.463	0.097	0.455	0.093	0.444	0.088	0.436	0.084
0.575	0.373	0.086	0.410	0.095	0.449	0.105	0.489	0.115	0.485	0.111	0.482	0.107	0.476	0.102	0.472	0.098
0.525	0.386	0.102	0.415	0.111	0.445	0.121	0.476	0.131	0.476	0.127	0.476	0.124	0.476	0.118	0.475	0.114
0.475	0.434	0.120	0.474	0.129	0.516	0.138	0.559	0.148	0.555	0.145	0.551	0.141	0.546	0.137	0.542	0.133
0.425	0.473	0.138	0.522	0.146	0.574	0.154	0.627	0.162	0.618	0.160	0.609	0.157	0.596	0.154	0.587	0.151
0.375	0.506	0.156	0.564	0.163	0.625	0.170	0.689	0.177	0.674	0.175	0.659	0.173	0.637	0.170	0.622	0.169
0.325	0.531	0.174	0.596	0.179	0.664	0.184	0.736	0.189	0.715	0.188	0.694	0.188	0.663	0.186	0.642	0.185
0.275	0.568	0.192	0.648	0.195	0.732	0.199	0.820	0.202	0.794	0.202	0.767	0.202	0.728	0.202	0.701	0.202
0.225	0.597	0.217	0.689	0.223	0.787	0.228	0.888	0.233	0.858	0.232	0.827	0.231	0.781	0.229	0.749	0.228
0.175	0.631	0.243	0.738	0.250	0.852	0.257	0.971	0.264	0.937	0.262	0.902	0.259	0.852	0.256	0.817	0.253
0.125	0.663	0.271	0.787	0.281	0.918	0.291	1.053	0.302	1.017	0.298	0.981	0.294	0.927	0.289	0.890	0.285
0.075	0.695	0.302	0.835	0.316	0.982	0.331	1.135	0.347	1.098	0.342	1.060	0.336	1.005	0.328	0.967	0.322
0.025	0.726	0.335	0.882	0.356	1.046	0.378	1.215	0.400	1.178	0.393	1.140	0.386	1.084	0.375	1.045	0.367
0.000	0.757	0.353	0.928	0.378	1.108	0.403	1.293	0.430	1.256	0.422	1.218	0.413	1.162	0.401	1.124	0.393

**FIG. 37 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES
PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR**

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.25$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.50$$



CUADRO 24: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.25
e_s/e_i	0.50

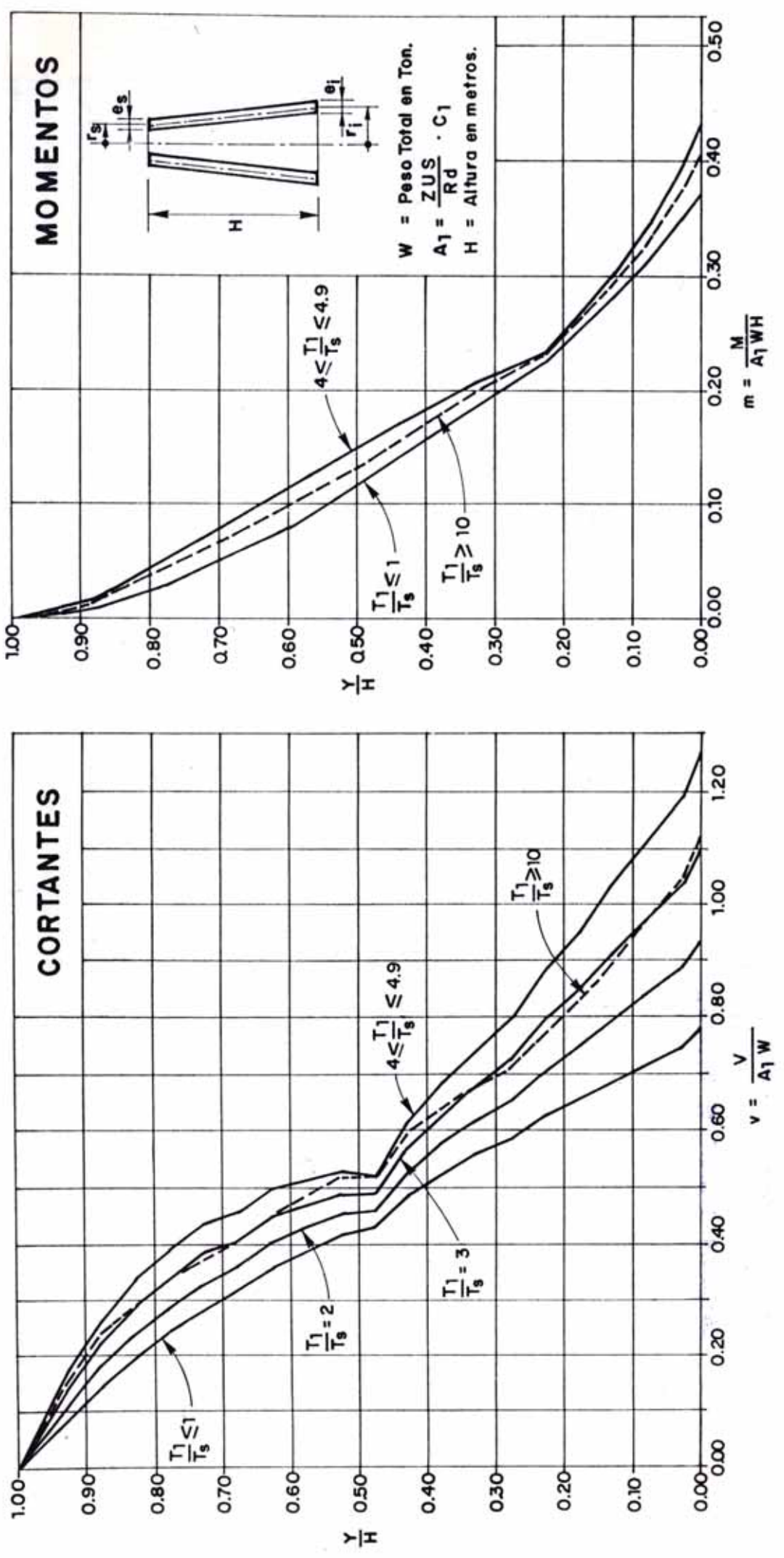
$$v = \frac{V}{A_1 \cdot H} \quad , \quad m = \frac{M}{A_1 \cdot H \cdot H}$$

$\frac{y}{H}$	$\frac{T_1}{T_s} < 1.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 2.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 3.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 3.45$		$\frac{T_1}{T_s} = 4.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 5.00$		$\frac{T_1}{T_s} = 6.00$		$\frac{T_1}{T_s} > 7.50$	
	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m	v	m
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.025	0.001	0.034	0.002	0.042	0.002	0.047	0.002	0.050	0.003	0.049	0.002	0.049	0.002	0.047	0.002
0.925	0.074	0.004	0.101	0.005	0.127	0.006	0.140	0.007	0.151	0.008	0.146	0.007	0.146	0.007	0.142	0.007
0.875	0.119	0.009	0.155	0.012	0.192	0.015	0.208	0.016	0.222	0.017	0.212	0.016	0.212	0.016	0.204	0.015
0.825	0.158	0.016	0.198	0.020	0.239	0.025	0.258	0.027	0.272	0.028	0.259	0.027	0.259	0.027	0.248	0.024
0.775	0.192	0.024	0.234	0.030	0.277	0.036	0.297	0.038	0.311	0.040	0.296	0.038	0.296	0.038	0.285	0.034
0.725	0.221	0.033	0.260	0.040	0.301	0.047	0.319	0.050	0.333	0.052	0.319	0.049	0.319	0.049	0.308	0.044
0.675	0.257	0.044	0.298	0.051	0.340	0.059	0.360	0.063	0.376	0.065	0.365	0.061	0.365	0.061	0.357	0.055
0.625	0.287	0.055	0.327	0.063	0.368	0.071	0.386	0.074	0.405	0.076	0.398	0.073	0.398	0.073	0.393	0.066
0.575	0.307	0.068	0.342	0.075	0.378	0.083	0.394	0.087	0.414	0.089	0.411	0.086	0.411	0.086	0.410	0.079
0.525	0.337	0.082	0.373	0.090	0.411	0.098	0.428	0.102	0.449	0.104	0.447	0.101	0.446	0.101	0.446	0.095
0.475	0.378	0.096	0.425	0.103	0.472	0.111	0.494	0.114	0.517	0.117	0.510	0.114	0.510	0.114	0.504	0.109
0.425	0.414	0.110	0.469	0.117	0.527	0.123	0.553	0.126	0.576	0.129	0.562	0.127	0.562	0.127	0.552	0.124
0.375	0.443	0.125	0.506	0.130	0.572	0.136	0.602	0.138	0.625	0.140	0.604	0.139	0.604	0.139	0.588	0.138
0.325	0.479	0.139	0.554	0.143	0.633	0.147	0.670	0.148	0.696	0.151	0.667	0.151	0.667	0.151	0.646	0.150
0.275	0.514	0.160	0.604	0.166	0.699	0.171	0.743	0.174	0.773	0.176	0.739	0.175	0.739	0.175	0.712	0.173
0.225	0.550	0.182	0.656	0.189	0.768	0.196	0.819	0.200	0.856	0.202	0.816	0.200	0.816	0.200	0.786	0.195
0.175	0.585	0.204	0.707	0.214	0.836	0.224	0.895	0.229	0.939	0.232	0.896	0.227	0.896	0.227	0.863	0.220
0.125	0.620	0.230	0.760	0.244	0.907	0.258	0.974	0.265	1.026	0.268	0.981	0.262	0.981	0.262	0.947	0.251
0.075	0.656	0.259	0.815	0.278	0.981	0.298	1.056	0.307	1.118	0.312	1.073	0.304	1.073	0.304	1.038	0.290
0.025	0.692	0.290	0.870	0.316	1.054	0.344	1.138	0.357	1.211	0.365	1.165	0.354	1.165	0.354	1.130	0.336
0.000	0.728	0.307	0.924	0.338	1.128	0.370	1.220	0.384	1.303	0.394	1.257	0.383	1.257	0.383	1.222	0.363

FIG. 38 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

$$\frac{r_s}{r_i} = 1.00$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.25$$



CUADRO 25: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	1.00
e_s/e_i	0.25

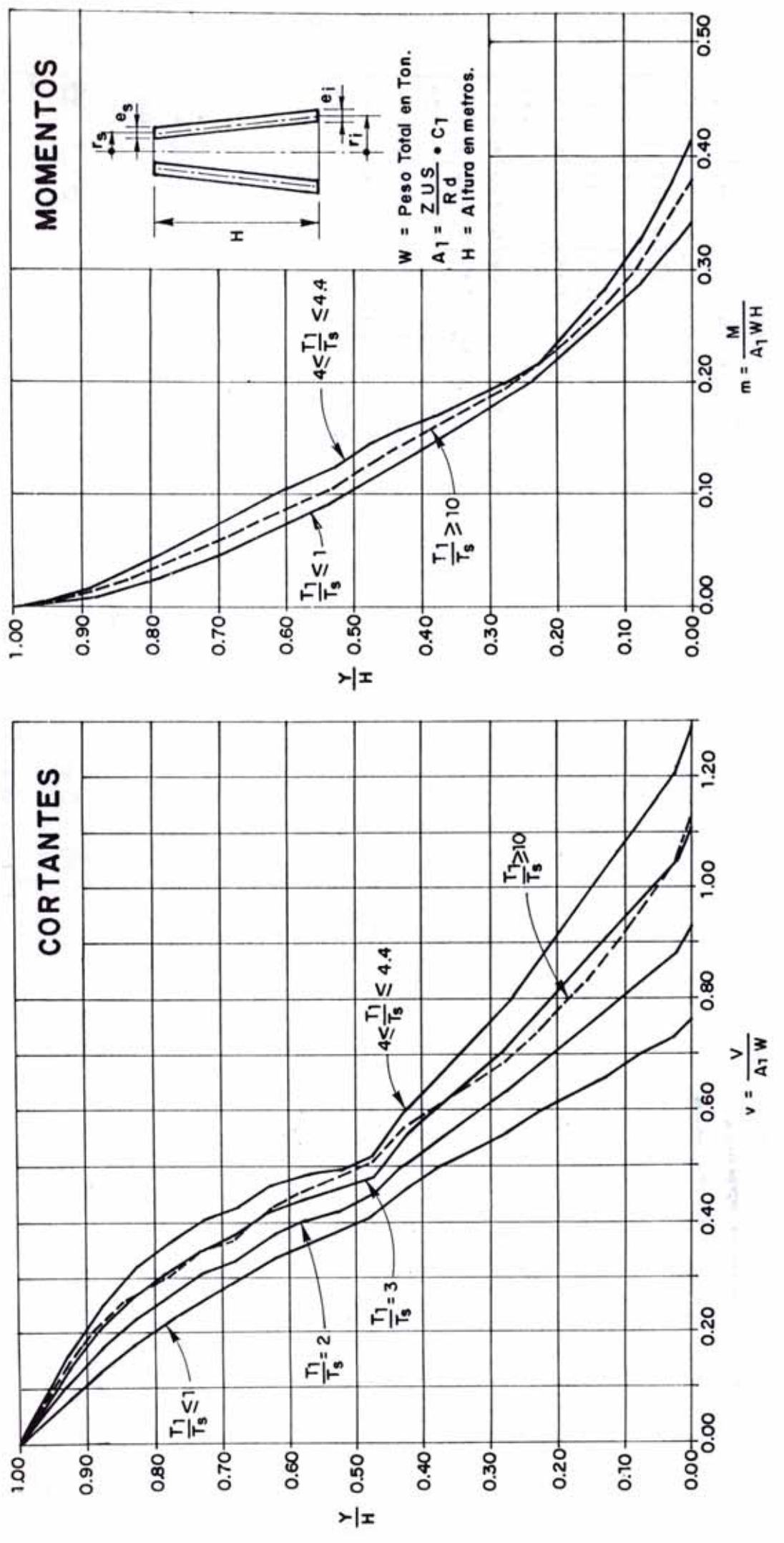
$$v = \frac{v}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{M}{A1.H.H}$$

$\frac{y}{H}$	$\frac{T1}{Ts} < 1$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$\frac{T1}{Ts} < 4.90$		$\frac{T1}{Ts} = 6.00$		$\frac{T1}{Ts} = 7.00$		$\frac{T1}{Ts} = 8.00$		$\frac{T1}{Ts} > 10.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.029	0.001	0.039	0.002	0.048	0.002	0.058	0.003	0.056	0.003	0.055	0.003	0.054	0.003	0.052	0.003
0.925	0.088	0.004	0.116	0.006	0.145	0.007	0.175	0.009	0.169	0.008	0.165	0.008	0.162	0.008	0.157	0.008
0.875	0.147	0.011	0.188	0.014	0.229	0.018	0.272	0.021	0.261	0.020	0.253	0.020	0.247	0.019	0.237	0.018
0.825	0.199	0.020	0.244	0.025	0.293	0.031	0.342	0.036	0.328	0.035	0.317	0.034	0.308	0.032	0.294	0.031
0.775	0.244	0.031	0.292	0.038	0.342	0.045	0.395	0.053	0.378	0.050	0.365	0.048	0.355	0.047	0.339	0.045
0.725	0.286	0.044	0.334	0.052	0.384	0.061	0.437	0.070	0.419	0.067	0.406	0.064	0.396	0.062	0.379	0.059
0.675	0.320	0.058	0.364	0.068	0.410	0.078	0.458	0.088	0.442	0.084	0.430	0.081	0.421	0.078	0.406	0.075
0.625	0.361	0.073	0.404	0.084	0.450	0.094	0.497	0.106	0.484	0.101	0.475	0.098	0.467	0.095	0.455	0.090
0.575	0.392	0.090	0.432	0.100	0.473	0.112	0.516	0.124	0.508	0.118	0.502	0.115	0.497	0.112	0.489	0.107
0.525	0.420	0.107	0.456	0.117	0.492	0.128	0.530	0.140	0.526	0.134	0.524	0.130	0.522	0.127	0.519	0.123
0.475	0.435	0.126	0.463	0.136	0.492	0.146	0.522	0.157	0.521	0.152	0.520	0.148	0.520	0.146	0.519	0.141
0.425	0.489	0.146	0.531	0.155	0.574	0.165	0.618	0.175	0.612	0.171	0.607	0.168	0.604	0.165	0.598	0.162
0.375	0.529	0.166	0.579	0.174	0.632	0.182	0.687	0.191	0.674	0.188	0.664	0.186	0.657	0.184	0.645	0.180
0.325	0.563	0.186	0.622	0.193	0.685	0.200	0.750	0.207	0.730	0.205	0.715	0.203	0.703	0.202	0.684	0.200
0.275	0.589	0.206	0.656	0.211	0.728	0.216	0.802	0.221	0.774	0.220	0.754	0.219	0.738	0.218	0.713	0.217
0.225	0.627	0.226	0.709	0.229	0.797	0.232	0.888	0.234	0.854	0.234	0.829	0.234	0.809	0.234	0.778	0.234
0.175	0.658	0.254	0.753	0.259	0.855	0.263	0.961	0.268	0.922	0.267	0.894	0.266	0.871	0.265	0.835	0.264
0.125	0.689	0.283	0.799	0.289	0.917	0.296	1.039	0.303	0.996	0.300	0.966	0.298	0.941	0.296	0.912	0.294
0.075	0.719	0.314	0.845	0.325	0.979	0.336	1.117	0.347	1.072	0.342	1.041	0.338	1.015	0.336	0.974	0.331
0.025	0.749	0.349	0.890	0.365	1.039	0.381	1.193	0.398	1.148	0.392	1.115	0.387	1.089	0.383	1.048	0.376
0.000	0.777	0.368	0.933	0.387	1.096	0.407	1.265	0.427	1.220	0.419	1.188	0.414	1.162	0.409	1.120	0.402

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.75$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.25$$

FIG. 39 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR



CUADRO 26: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.75
e_s/e_i	0.25

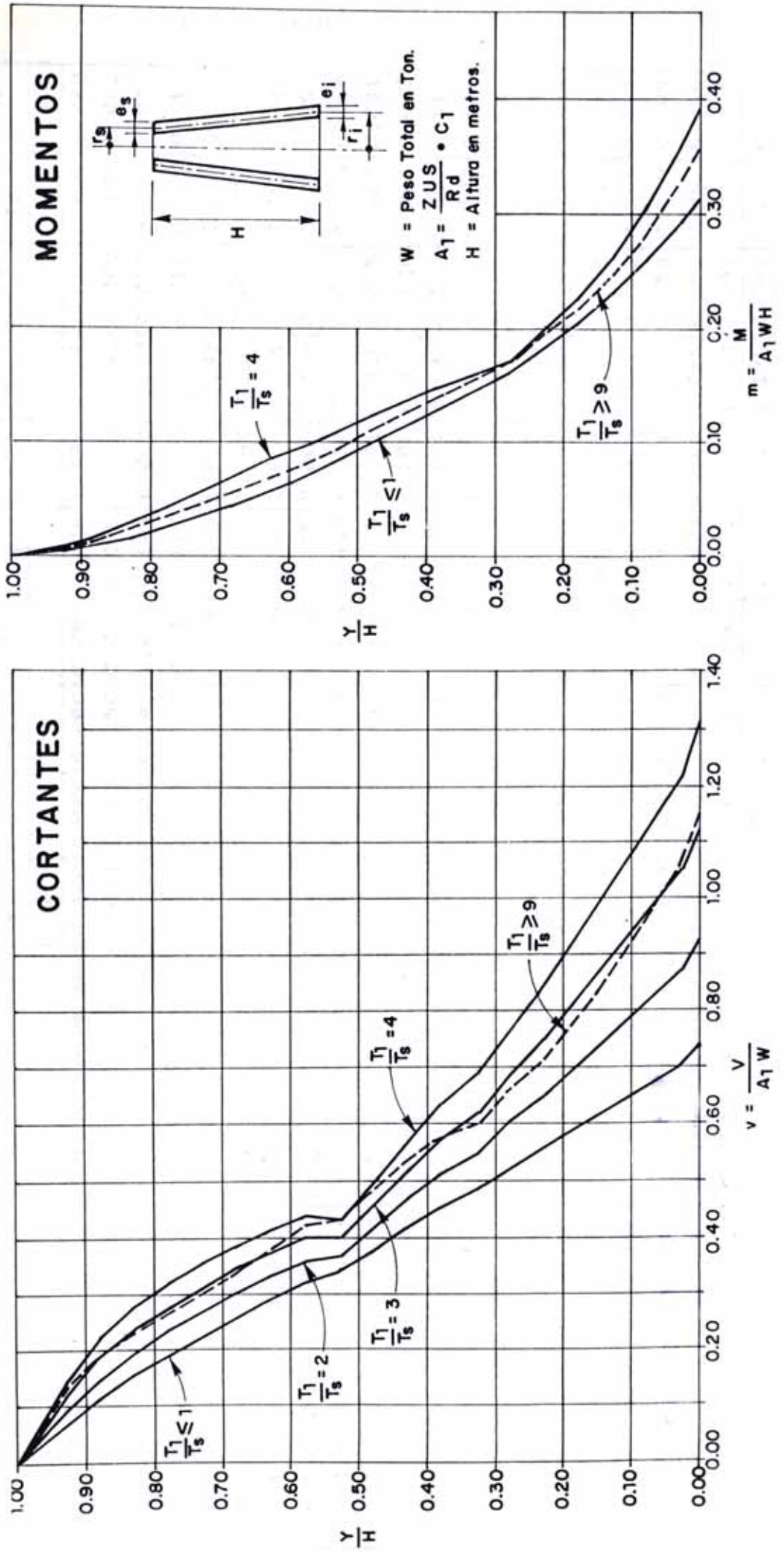
$$v = \frac{v}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{M}{A1.H.H}$$

$\frac{Y}{H}$	$\frac{T1}{Ts} < 1.00$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$4 < \frac{T1}{Ts}$		$\frac{T1}{Ts} = 5.00$		$\frac{T1}{Ts} = 6.00$		$\frac{T1}{Ts} = 8.00$		$\frac{T1}{Ts} < 10.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.027	0.001	0.036	0.002	0.046	0.002	0.055	0.003	0.054	0.003	0.053	0.003	0.053	0.003	0.049	0.002
0.925	0.082	0.004	0.109	0.006	0.137	0.007	0.166	0.008	0.162	0.008	0.158	0.008	0.151	0.008	0.147	0.007
0.875	0.136	0.010	0.174	0.014	0.214	0.017	0.255	0.020	0.249	0.019	0.240	0.019	0.227	0.018	0.218	0.017
0.825	0.182	0.019	0.226	0.023	0.272	0.028	0.320	0.034	0.311	0.033	0.299	0.031	0.281	0.030	0.268	0.028
0.775	0.222	0.028	0.268	0.035	0.316	0.042	0.366	0.049	0.355	0.047	0.341	0.045	0.321	0.042	0.306	0.040
0.725	0.261	0.040	0.307	0.048	0.356	0.056	0.406	0.065	0.395	0.063	0.381	0.060	0.360	0.056	0.345	0.053
0.675	0.294	0.052	0.336	0.061	0.381	0.071	0.428	0.080	0.418	0.078	0.405	0.074	0.386	0.070	0.373	0.066
0.625	0.332	0.066	0.374	0.076	0.419	0.086	0.465	0.097	0.457	0.094	0.447	0.090	0.433	0.084	0.423	0.080
0.575	0.362	0.081	0.402	0.091	0.444	0.102	0.486	0.112	0.481	0.109	0.475	0.105	0.466	0.099	0.460	0.095
0.525	0.386	0.096	0.421	0.105	0.457	0.115	0.494	0.125	0.493	0.122	0.491	0.118	0.488	0.112	0.485	0.108
0.475	0.413	0.114	0.447	0.124	0.482	0.134	0.518	0.144	0.517	0.141	0.515	0.137	0.513	0.132	0.511	0.128
0.425	0.460	0.132	0.506	0.141	0.553	0.150	0.601	0.159	0.596	0.157	0.590	0.154	0.580	0.149	0.573	0.146
0.375	0.497	0.150	0.551	0.158	0.607	0.165	0.666	0.173	0.656	0.171	0.644	0.169	0.625	0.165	0.612	0.163
0.325	0.529	0.169	0.592	0.175	0.659	0.181	0.728	0.187	0.714	0.186	0.694	0.185	0.667	0.182	0.648	0.181
0.275	0.561	0.187	0.635	0.191	0.714	0.195	0.795	0.199	0.776	0.199	0.751	0.198	0.714	0.198	0.688	0.197
0.225	0.596	0.208	0.684	0.212	0.778	0.216	0.875	0.220	0.852	0.220	0.821	0.219	0.777	0.218	0.746	0.218
0.175	0.630	0.234	0.734	0.240	0.844	0.246	0.958	0.252	0.932	0.250	0.897	0.249	0.846	0.246	0.811	0.244
0.125	0.662	0.262	0.782	0.270	0.908	0.278	1.039	0.287	1.010	0.285	0.973	0.282	0.918	0.277	0.880	0.273
0.075	0.697	0.292	0.833	0.304	0.977	0.317	1.126	0.331	1.097	0.327	1.058	0.322	1.001	0.315	0.962	0.310
0.025	0.729	0.326	0.882	0.344	1.043	0.363	1.209	0.383	1.180	0.378	1.140	0.371	1.083	0.362	1.043	0.355
0.000	0.761	0.344	0.930	0.365	1.108	0.388	1.290	0.412	1.261	0.406	1.222	0.399	1.164	0.388	1.125	0.380

**FIG. 40 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES
PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR**

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.50$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.25$$



CUADRO 27: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

r_s/r_i	0.50
e_s/e_i	0.25

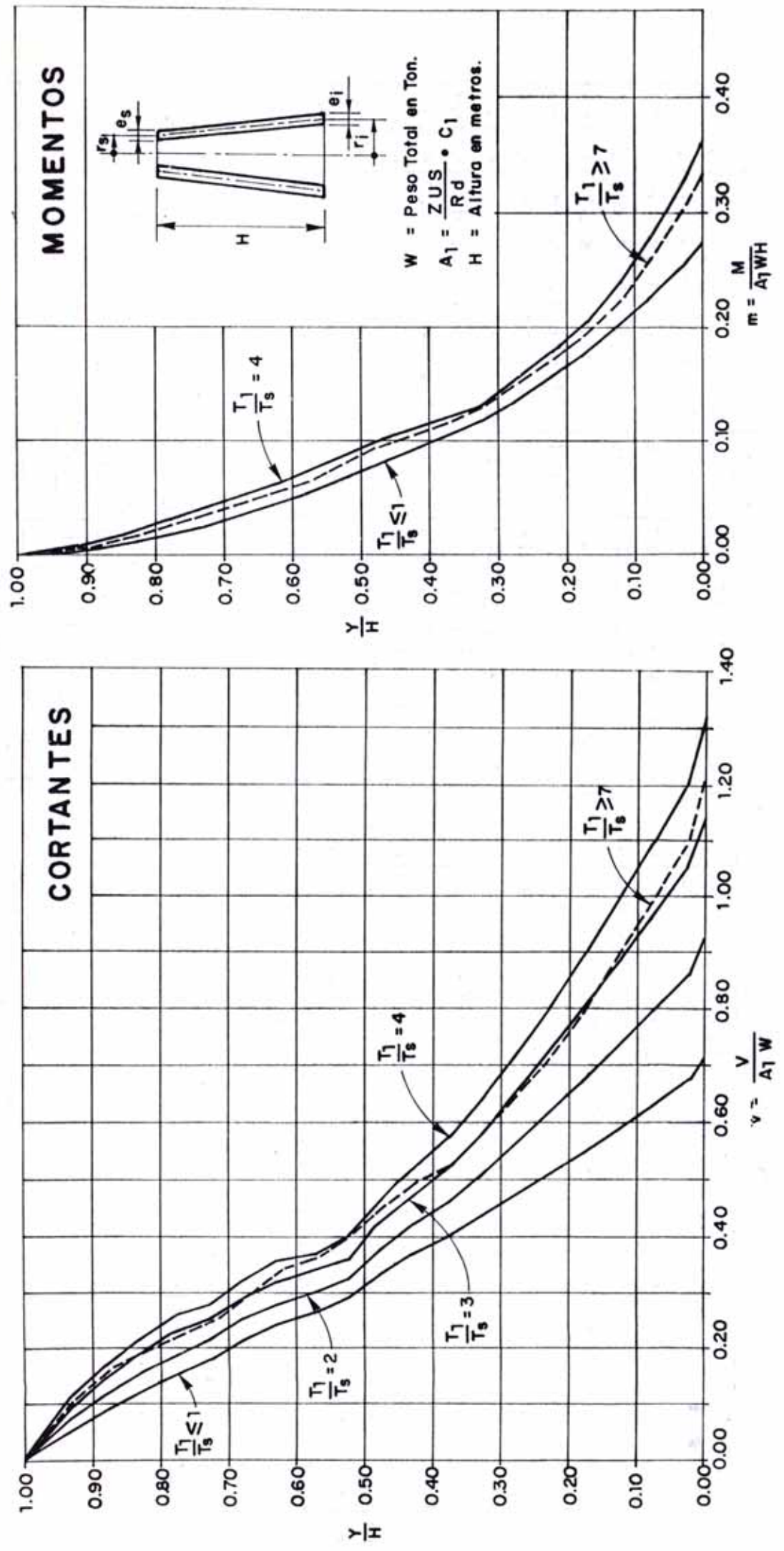
$$v = \frac{v}{A1.H} \quad , \quad M = \frac{M}{A1.H.H}$$

$\frac{Y}{H}$	$\frac{T1}{Ts} < 1.00$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.80$		$\frac{T1}{Ts} = 4.00$		$\frac{T1}{Ts} = 5.00$		$\frac{T1}{Ts} = 7.00$		$\frac{T1}{Ts} < 9.00$	
	M		M		M		M		M		M		M		M	
	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.024	0.001	0.033	0.002	0.041	0.002	0.048	0.002	0.050	0.003	0.048	0.002	0.046	0.002	0.044	0.002
0.925	0.072	0.004	0.098	0.005	0.124	0.006	0.145	0.007	0.149	0.008	0.144	0.007	0.137	0.007	0.133	0.007
0.875	0.119	0.009	0.155	0.012	0.192	0.015	0.221	0.017	0.227	0.018	0.217	0.017	0.203	0.016	0.194	0.015
0.825	0.158	0.016	0.199	0.020	0.241	0.025	0.276	0.029	0.282	0.030	0.268	0.028	0.249	0.026	0.236	0.025
0.775	0.194	0.024	0.237	0.030	0.282	0.037	0.319	0.042	0.325	0.042	0.309	0.040	0.286	0.037	0.272	0.035
0.725	0.228	0.034	0.271	0.041	0.316	0.049	0.353	0.055	0.360	0.056	0.343	0.053	0.321	0.049	0.306	0.046
0.675	0.261	0.045	0.303	0.053	0.347	0.062	0.383	0.068	0.390	0.070	0.375	0.066	0.356	0.060	0.343	0.057
0.625	0.293	0.057	0.334	0.066	0.376	0.075	0.411	0.082	0.418	0.084	0.403	0.079	0.393	0.073	0.384	0.069
0.575	0.322	0.070	0.361	0.078	0.402	0.087	0.434	0.095	0.442	0.096	0.436	0.091	0.428	0.085	0.423	0.081
0.525	0.337	0.084	0.368	0.092	0.401	0.101	0.427	0.109	0.434	0.110	0.433	0.106	0.432	0.100	0.431	0.095
0.475	0.380	0.099	0.421	0.108	0.462	0.117	0.496	0.124	0.504	0.125	0.500	0.121	0.495	0.115	0.492	0.112
0.425	0.422	0.115	0.471	0.122	0.523	0.130	0.564	0.137	0.573	0.138	0.563	0.135	0.549	0.130	0.540	0.128
0.375	0.457	0.130	0.516	0.137	0.577	0.144	0.628	0.149	0.637	0.150	0.619	0.148	0.595	0.145	0.578	0.143
0.325	0.485	0.146	0.551	0.151	0.621	0.156	0.678	0.160	0.688	0.161	0.662	0.160	0.626	0.159	0.602	0.158
0.275	0.525	0.162	0.607	0.166	0.693	0.170	0.764	0.173	0.775	0.173	0.742	0.173	0.696	0.173	0.666	0.173
0.225	0.557	0.185	0.653	0.191	0.754	0.196	0.837	0.201	0.850	0.202	0.810	0.200	0.756	0.198	0.720	0.197
0.175	0.595	0.208	0.708	0.216	0.827	0.223	0.924	0.229	0.941	0.230	0.897	0.227	0.835	0.222	0.795	0.219
0.125	0.632	0.234	0.763	0.245	0.901	0.256	1.014	0.265	1.034	0.266	0.987	0.261	0.922	0.254	0.879	0.249
0.075	0.668	0.263	0.818	0.279	0.976	0.295	1.103	0.308	1.127	0.310	1.078	0.303	1.011	0.292	0.967	0.286
0.025	0.705	0.296	0.873	0.318	1.049	0.341	1.192	0.360	1.219	0.362	1.171	0.353	1.103	0.340	1.059	0.331
0.000	0.740	0.313	0.927	0.339	1.122	0.366	1.280	0.389	1.311	0.392	1.262	0.381	1.195	0.366	1.151	0.356

FIG. 41 CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES PARA CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

$$\frac{r_s}{r_i} = 0.25$$

$$\frac{e_s}{e_i} = 0.25$$



CUADRO 28: CORTANTES Y MOMENTOS ADIMENSIONALES DE CHIMENEAS DE SECCION CIRCULAR

$$v = \frac{U}{A1.H} \cdot M = \frac{H}{A1.H.H}$$

r_s/r_i	0.25
e_s/e_i	0.25

Y/H	$\frac{T1}{Ts} < 1$		$\frac{T1}{Ts} = 2.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.00$		$\frac{T1}{Ts} = 3.15$		$\frac{T1}{Ts} = 4.00$		$\frac{T1}{Ts} = 5.00$		$\frac{T1}{Ts} = 6.00$		$\frac{T1}{Ts} < 7.00$	
	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M	v	M
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.975	0.019	0.001	0.026	0.001	0.033	0.002	0.034	0.002	0.039	0.002	0.042	0.002	0.048	0.002	0.055	0.002
0.925	0.056	0.003	0.078	0.004	0.100	0.005	0.103	0.005	0.117	0.006	0.125	0.006	0.138	0.007	0.155	0.008
0.875	0.092	0.007	0.123	0.009	0.153	0.012	0.158	0.013	0.175	0.013	0.185	0.013	0.205	0.015	0.225	0.017
0.825	0.134	0.012	0.159	0.016	0.196	0.020	0.201	0.020	0.220	0.022	0.230	0.022	0.250	0.024	0.270	0.026
0.775	0.155	0.019	0.192	0.024	0.231	0.029	0.237	0.029	0.257	0.032	0.268	0.032	0.290	0.035	0.310	0.038
0.725	0.180	0.026	0.215	0.032	0.253	0.038	0.259	0.039	0.278	0.041	0.288	0.041	0.310	0.044	0.330	0.047
0.675	0.214	0.035	0.253	0.041	0.293	0.048	0.299	0.049	0.323	0.052	0.333	0.052	0.355	0.056	0.375	0.060
0.625	0.244	0.044	0.282	0.051	0.323	0.058	0.329	0.059	0.357	0.062	0.366	0.062	0.388	0.066	0.408	0.070
0.575	0.265	0.054	0.300	0.062	0.337	0.069	0.342	0.070	0.371	0.073	0.379	0.073	0.400	0.077	0.420	0.080
0.525	0.290	0.067	0.326	0.074	0.362	0.082	0.368	0.083	0.399	0.087	0.406	0.087	0.425	0.091	0.445	0.094
0.475	0.332	0.079	0.378	0.086	0.424	0.093	0.431	0.094	0.466	0.098	0.472	0.098	0.490	0.102	0.510	0.105
0.425	0.369	0.091	0.423	0.097	0.480	0.104	0.488	0.105	0.524	0.109	0.529	0.109	0.545	0.113	0.565	0.117
0.375	0.400	0.104	0.462	0.109	0.528	0.114	0.537	0.115	0.573	0.119	0.577	0.119	0.590	0.123	0.610	0.127
0.325	0.437	0.117	0.512	0.121	0.591	0.125	0.603	0.125	0.642	0.129	0.645	0.129	0.660	0.133	0.680	0.137
0.275	0.475	0.136	0.566	0.142	0.662	0.147	0.676	0.148	0.723	0.152	0.725	0.152	0.735	0.156	0.755	0.160
0.225	0.514	0.155	0.622	0.163	0.736	0.170	0.753	0.171	0.810	0.175	0.811	0.175	0.820	0.179	0.840	0.183
0.175	0.552	0.176	0.678	0.186	0.810	0.197	0.830	0.198	0.899	0.202	0.899	0.202	0.905	0.206	0.925	0.210
0.125	0.591	0.200	0.737	0.214	0.889	0.229	0.912	0.231	0.996	0.237	0.996	0.237	1.000	0.241	1.020	0.245
0.075	0.632	0.227	0.798	0.246	0.972	0.267	0.997	0.270	1.098	0.279	1.098	0.279	1.100	0.283	1.120	0.287
0.025	0.673	0.257	0.861	0.284	1.056	0.313	1.084	0.317	1.203	0.330	1.203	0.330	1.205	0.334	1.225	0.338
0.000	0.714	0.274	0.923	0.306	1.140	0.339	1.171	0.344	1.309	0.360	1.309	0.360	1.310	0.364	1.330	0.368

CAPITULO 4

METODO ESTATICO PARA DETERMINAR LAS
FUERZAS CORTANTES Y LOS MOMENTOS
FLECTORES

4.1 Análisis de las Chimeneas Adimensionales presentadas

En el Item 2.1 mostramos la gama de 16 chimeneas adimensionales obtenidas como resultado de la variación correspondiente a la relación de radios medios y espesores.

Con estas chimeneas, se llevó a cabo la investigación realizando el análisis dinámico de cada una de ellas; en el Item 3.3 se muestran los gráficos adimensionales de cortantes y momentos que se obtuvieron para cada relación de periodos $T1/Ts$ en las chimeneas en mención.

El objetivo de este capítulo es reducir esta gama a una cantidad menor, de tal manera que su empleo sea lo suficientemente sencillo y práctico y nos pueda servir además, de base para encontrar el método estático que deseamos.

Para efectuar esta reducción, fue necesario estudiar todas las respuestas calculadas en cada uno de los 16 modelos. Podemos comprobar que las respuestas sísmicas de algunos de ellos son prácticamente iguales, notándose claramente la posibilidad de poder agruparlos.

Encontramos que cualquier chimenea puede ser expresada por el valor que adopta un parámetro característico y no por el valor de las dos relaciones conocidas.

4.1.1 Comparación de los Cortantes y Momentos Adimensionales

Como ya hemos mencionado, el estudio realizado en todas las respuestas sísmicas calculadas en los 16 modelos, nos permitió descubrir que cualquier chimenea puede expresarse por el valor que adopta el parámetro característico siguiente:

$$\xi = \frac{r_s \cdot e_s}{r_i \cdot e_i}$$

debido a que para estructuras con igual valor de " ξ ", las respuestas sísmicas que se obtienen correspondientes a las fuerzas cortantes y momentos flectores son sensiblemente parecidos.

Esta observación nos permitió reducir el total de modelos a solo seis, siendo éstos nada menos que las seis variantes escogidas para el parámetro característico:

$$\xi = 1.00, 0.75, 0.50, 0.25, 0.125, 0.0625$$

Con la finalidad de apreciar esta observación, analizaremos las respuestas sísmicas de tres chimeneas con igual parámetro característico, cuyas relaciones fundamentales son las siguientes:

	r_s/r_i	e_s/e_i	ξ
chimenea 1	0.25	1.00	0.25
chimenea 2	0.50	0.50	0.25
chimenea 3	1.00	0.25	0.25

Consideraremos para ello, dos casos extremos del espectro de respuesta, encontrándose entonces la relación de periodos T_1/T_s en los rangos siguientes:

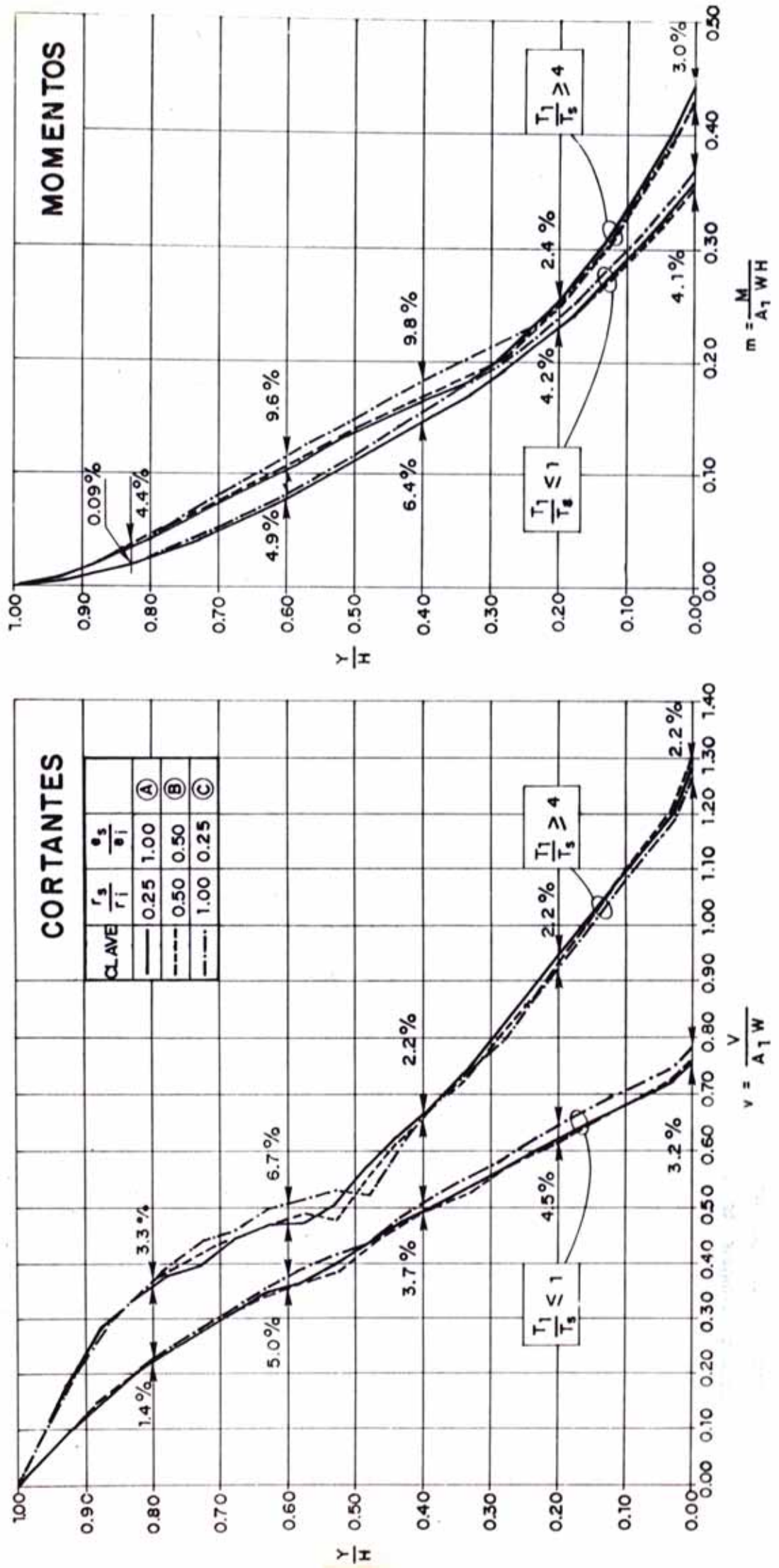
$$\frac{T_1}{T_s} \leq 1 \quad \text{y} \quad \frac{T_1}{T_s} \geq 4$$

En la figura 42 se muestran los gráficos correspondientes a las fuerzas cortantes y momentos flectores de cada grupo de chimeneas en el rango seleccionado, podemos apreciar la proximidad que existe entre las curvas. Esto nos indujo a considerar para cada caso una curva representativa conformada por los valores máximos, determinándonos de esta manera una envolvente de respuestas.

Trazada la envolvente, encontramos que el error máximo que cometíamos es del orden del 6.7% para las fuerzas cortantes y del 9.8% para los momentos flectores, ubicados en secciones de la chimenea distantes de la base.

FIG. 42 COMPARACION GRAFICA DE LAS RESPUESTAS SISMICAS DE TRES CHIMENEAS ADIMENSIONALES

$$\xi = \frac{r_s \cdot e_s}{r_i \cdot e_i} = 0.25$$



En la base, el error cometido para los cortantes es igual al 3.2%, mientras que para los momentos es del 4.1%, resultando ambos porcentajes aceptables para cálculos de esta naturaleza y más aún, nos sirven como un factor de seguridad para aquellas chimeneas que posean poca masa inercial y son extremadamente esbeltas.

Utilizando el criterio presentado, se realizó la confección de una serie de envolventes que agrupaban a ciertos modelos, bajo las mismas características espectrales, llámese así a la relación de periodos T_1/T_s .

Agrupados los modelos, pudimos reducir la gama inicial a solo seis, debido a que de esta forma el planteamiento del método estático se vería conformado por estas seis variantes muy prácticas de usar.

4.2 Método Estático Simplificado para determinar las Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores

Como hemos podido comprobar, la gama de chimeneas adimensionales consideradas en esta tesis se simplificaron convenientemente a un total de seis, quedando demostrado que cualquiera de ellas puede ser representada por el valor de:

$$\xi = \frac{r_s \cdot e_s}{r_i \cdot e_i}$$

Esto significa que, una chimenea queda identificada con sólo el valor de un parámetro, el que resulta de multiplicar los valores correspondientes a la relación de radios medios y espesores que posee.

Para obtener resultados más precisos, en el cálculo de la respuestas sísmicas, bastará con emplear los gráficos o tablas presentadas en el Item 3.3. Dicha información se confeccionó efectuando el análisis dinámico de todas las chimeneas adimensionales utilizando el Método Matricial escogido (Ver Item 1.4). Para su empleo será necesario conocer, independientemente, el valor que adoptan cada una de sus relaciones geométricas características.

De igual manera conocidas estas relaciones, podremos calcular el valor de los periodos fundamentales de vibración de cada una de las chimeneas; para ello bastará con encontrar los coeficientes correspondientes empleando la formulación propuesta en el Item 2.2.

Con la finalidad de obtener un método estático simplificado que logre determinar las fuerzas cortantes y momentos flectores necesarios para realizar el diseño de la estructura, se estudiaron las respuestas sísmicas de cada una de las seis nuevas chimeneas adimensionales identificadas con el parámetro " ξ ".

Para cada valor de este parámetro, se evaluaron las respuestas sísmicas correspondientes a distintas relaciones de periodos $T1/Ts$. Los siete valores escogidos para esta relación fueron:

$$\frac{T1}{Ts} \leq 1, 2, 3, 4, 6, 8, \geq 10$$

resultando por lo tanto, un total de 42 diseños efectuados.

La interpretación de toda la información obtenida nos condujo a plantear el método estático, consistente en la determinación de coeficientes para el cálculo de las fuerzas cortantes y momentos flectores finales actuantes en la estructura.

La metodología empleada consistió en trazar una curva envolvente en cada una de las siete respuestas sísmicas calculadas, para cada chimenea adimensional de parámetro " ξ ".

Para ello fue necesario graficar las correspondientes respuestas reales de fuerzas cortantes y momentos flectores adimensionales con el objetivo de encontrar más fácilmente dichas envolventes.

En el Cuadro 29, se muestra el método estático simplificado con toda la información necesaria para su empleo.

En este cuadro se encuentran dos tablas que corresponden a los valores tabulados para los coeficientes de Fuerzas Cortantes (v) y de Momentos Flectores (m) obtenidos de la envolvente trazada en cada respuesta sísmica.

Estos coeficientes han sido calculados para cinco niveles de la chimenea, representados por la relación de alturas Y/H siguiente:

$$\frac{Y}{H} = 0.80, 0.60, 0.40, 0.20, 0.00$$

Podemos apreciar que cada tabla es de doble entrada, teniendo por un lado las seis variantes del parámetro " ξ " con sus cinco niveles principales, y por el otro los siete casos considerados para la relación de periodos $T1/Ts$.

Por lo tanto, con solo determinar ambas expresiones podremos encontrar los coeficientes v y m de cualquier chimenea particular. Para casos intermedios, bastará efectuar una interpolación para calcular sus coeficientes respectivos.

Es importante observar que el efecto de los modos superiores al primero, hace que exista una concentración de fuerza cortante en la parte superior de la chimenea, efecto que algunos ingenieros denominan "chicoteo", por tal motivo es conveniente considerar

que el extremo superior tenga un cortante igual al 20% del basal, de esta manera se logra un buen ajuste en el diagrama de Fuerzas Cortantes, es decir:

$$V_{1.00} = 20\% \cdot V_{0.00}$$

CAPITULO 5

DISEÑO SISMICO DE CHIMENEAS EN VOLADIZO
DE SECCION CIRCULAR EMPOTRADAS EN LA BASE
PLANTEAMIENTO DE NORMAS PARA EL
R.N.C. - PERU

5.1 Formulación del Método Estático Propuesto

A continuación indicaremos los pasos a seguir para emplear el Método Estático propuesto presentado en el Item 4.2 del capítulo anterior.

Con este método podremos calcular las respuestas sísmicas correspondientes a cualquier chimenea para una relación de periodos $T1/Ts$ determinada.

Para situaciones intermedias, el cálculo de las respuestas se consigue efectuando una interpolación entre chimeneas de similares características.

Finalmente, esperamos que la utilidad de esta propuesta se vea reflejada en el interés de los proyectistas por el tema, de tal manera que pueda servir de base para un futuro reglamento sísmico peruano, debido fundamentalmente a que el actual R.N.C. (13) no incluyó un Método Estático para el análisis sísmico de chimeneas.

5.1.1 Parámetro Característico de la Chimenea

Como sabemos, una chimenea queda identificada por el valor que adopta el parámetro característico siguiente:

$$\xi = \frac{r_s \cdot e_s}{r_i \cdot e_i}$$

representado este valor por el producto de sus dos relaciones fundamentales:

- relación de radios medios (r_s/r_i) y
- relación de espesores (e_s/e_i)

En el método presentado, consideramos seis valores para el parámetro característico, siendo estos iguales a:

$$\xi = 1.00, 0.75, 0.50, 0.25, 0.125, 0.0625$$

5.1.2 Periodos de Vibración

Para calcular los periodos de vibración, será necesario emplear la formulación presentada en el Item 2.2, o más específicamente, bastará con seguir las indicaciones mostradas en la figura 22.

Para situaciones intermedias, se dispone de diagramas para determinar los periodos de vibración, tal como lo podemos ver en la figura 23. En cada uno de ellos encontraremos los coeficientes necesarios para calcular dichos periodos.

5.1.3 Respuestas Sísmicas

Podemos decir que es en este punto donde se encuentra el mayor logro de toda la tesis, y es porque con estas respuestas el diseño de cualquier estructura continua tipo chimenea, se hace prácticamente fácil, sin necesidad de

recorrir a un análisis dinámico riguroso.

Una vez que conocemos el parámetro característico de la chimenea ξ (ver Item 5.1.1) y hemos efectuado el cálculo para obtener el periodo fundamental de vibración T_1 (Ver Item 5.1.2), podremos utilizar el Cuadro 29 mostrado en el Item 4.2.

En dicho cuadro, con solo conocer la relación de periodos T_1/T_s , y determinado el valor del parámetro característico, conseguiremos encontrar las respuestas sísmicas que correspondan a la chimenea en estudio.

5.2 Comparación entre el Método Estático propuesto y el Método Dinámico escogido

5.2.1 Casos Particulares

Para llevar a cabo la comparación entre el método estático propuesto y el método dinámico escogido, fue necesario analizar los resultados obtenidos en dos chimeneas reales cuyas características físicas y geométricas se muestran en la figura 14.

Empleando el método matricial escogido, realizamos el análisis dinámico de ambas estructuras. Los resultados obtenidos los podemos apreciar en las figuras 43 y 44, que son nada

FIG. 44 RESULTADOS DEL PROGRAMA DE COMPUTO
FIG. 43 RESULTADOS DEL PROGRAMA DE COMPUTO

FECHA : 60 07-07-89

USUARIO : IVAN

DISEÑO SÍSMICO DE CHIMENEAS EN VOLADIZO DE SECCIÓN CIRCULAR EMPOTRADAS EN LA BASE

tipo de sección : VARIABLE + tipo de dato : ESPECIFICO + método usado : JACOBI + número de masas : 20

1) CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOMÉTRICAS

ALTEZA TOTAL (mt) = 75.2 F.C. CONCRETO (kg/cm²) = 210 FACTOR TAMA (I) = 1 FACTOR SUELO (S) = 1
 RADIO INFERIOR (mt) = 1.325 ESPESOR INFERIOR (mt) = .61 FACTOR USO (U) = 1.3 PERIODO SUELO (T_s) = .3
 RADIO SUPERIOR (mt) = 7.625 ESPESOR SUPERIOR (mt) = .1525 DUCTILIDAD (R_d) = 3 RECURSAMIENTO (R_t) = 0

2) CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.0000
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.1374
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.2970
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.2484
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.2859
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.3701
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.3556
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.3724
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.4378
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.4303
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.4952
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.1156
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.1301
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.1451
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.1506
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.1750
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.1900
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.2021
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.2338
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.2523
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.2702
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.3392
 COEFICIENTE RELACION (T_s) = 0.3582

3) CARACTERÍSTICAS POR NIVEL : MASA (ton) = 54.421 y PESO (ton) = 534.461

NIVEL	MASA (t)	E ₁ (T=0.2)	E ₂ (T=0.2)	E ₃ (T=0.2)	E ₄ (T=0.2)	E ₅ (T=0.2)	E ₆ (T=0.2)	E ₇ (T=0.2)	E ₈ (T=0.2)	E ₉ (T=0.2)	E ₁₀ (T=0.2)	E ₁₁ (T=0.2)	E ₁₂ (T=0.2)	E ₁₃ (T=0.2)	E ₁₄ (T=0.2)	E ₁₅ (T=0.2)	E ₁₆ (T=0.2)	E ₁₇ (T=0.2)	E ₁₈ (T=0.2)	E ₁₉ (T=0.2)	E ₂₀ (T=0.2)	
1	0.751	54231.175	74.225	0.574	1.4000-01	2.4370	5.0700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.897	74451.110	70.432	0.524	1.4350-01	1.6826	7.5030	0.2970	0.1374	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	1.054	92910.330	58.527	0.874	1.2650-01	1.3878	9.2037	0.2484	0.2970	0.0659	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	1.221	118427.256	52.820	0.824	1.1410-01	1.2666	10.5735	0.2859	0.2484	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.399	149160.399	39.014	0.774	1.0030-01	1.2181	11.8660	0.3701	0.2859	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	1.595	178774.540	35.204	0.724	0.8740-02	1.2644	13.1782	0.3556	0.3701	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	1.783	212115.729	31.399	0.675	7.8200-02	1.3099	14.5425	0.3724	0.3556	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	1.990	261521.520	47.391	0.625	6.8040-02	1.3929	15.8624	0.4378	0.3724	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	2.208	318146.297	45.783	0.575	5.8280-02	2.4033	18.7695	0.4303	0.4378	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	2.436	384739.330	39.973	0.525	4.8920-02	1.9922	19.7695	0.4952	0.4303	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	2.675	474155.074	35.168	0.475	4.0700-02	1.6525	20.3427	0.5490	0.4952	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	2.923	589972.700	32.357	0.425	3.3030-02	1.1516	22.0952	0.5938	0.5490	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	3.182	709950.778	25.549	0.375	2.6950-02	2.6020	23.1568	0.6349	0.5938	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	3.451	878372.415	24.740	0.325	1.9840-02	2.2149	25.7597	0.6850	0.6349	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	3.730	1095857.684	20.931	0.275	1.4430-02	2.9304	27.9745	0.7349	0.6850	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	4.020	1389076.750	17.103	0.225	9.7750-03	3.2007	30.9049	0.8340	0.7349	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	4.319	1611285.598	13.313	0.175	5.9920-03	3.3252	34.1056	0.9204	0.8340	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	4.629	1945239.462	9.503	0.125	3.0940-03	3.3996	37.4060	1.0101	0.9204	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	4.949	2393774.546	5.594	0.075	1.1240-03	3.4188	40.8203	1.1019	1.0101	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	5.280	2970044.059	1.865	0.025	1.2220-04	0.0000	44.2470	1.1941	1.1019	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BASE					0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

4) CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE CADA MODO DE VIBRACION

MODO	FRECUENCIA (Hz)	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL	RELACION MODAL
1	2.5733	11.2901	27.0441	50.4636	51.8795																		
2	1.0000	3.7872	9.0957	18.2723	27.4731																		
3	0.3333	0.3565	0.2527	0.1245	0.0769																		
4	1.0000	0.2634	0.1099	0.0589	0.0384																		
5	0.1660	0.2200	0.4000	0.4000	0.4000																		
6	78.40-04	934.30-05	232.50-05	167.70-06	284.50-06																		
7	1.956	-1.604	1.096	-0.769	0.555																		
8	150.50-03	-149.95-04	254.80-05	-513.40-06	141.80-04																		
9	20.172	11.428	5.695	3.224	2.182																		
10	40.70	20.98	10.45	6.10	3.95																		
11	40.70	61.67	75.13	78.23	80.18																		

Coefficiente Sísmico (A1-TUSC1/Rd) = 0.069

FIG. 44 RESULTADOS DEL PROGRAMA DE COMPUTO

FECHA : 80 23-07-89

USUARIO : IVAN

DISEÑO SÍSMICO DE CHIMENEAS EN VOLADIZO DE SECCIÓN CIRCULAR EMPOTRADAS EN LA BASE

tipo de sección : UNIFORME + tipo de dato : ESPECIFICO + método usado : JACOBI + número de masas : 20

1) CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOMÉTRICAS

ALTIMA TOTAL (m) = 50 F' C CONCRETO (kg/cm²) = 210
 RADIO INFERIOR (m) = 2.3333 ESPESOR INFERIOR (m) = .333
 RADIO SUPERIOR (m) = 2.3333 ESPESOR SUPERIOR (m) = .333

2) CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

FACTORA ZONA (Z) = 1 FACTOR SUELO (S) = 1
 FACTOR USO (U) = 1.3 PERIODO SUELO (T_s) = .3
 DUCTILIDAD (R_d) = 3 RECURSAMIENTO (R_r) = 0

3) CARACTERÍSTICAS POR NIVEL : MASA (ton) = 59.723 y PESO (ton) = 585.886

NIVEL	MASA (t)	EI (I=0)	Y _{CG} (m)	Y _{CG} (m)	DESPLAZAMIENTO (m)	FUERZA (Ton)	CONSTANTE (Ton)	RELACION (F/R)	MOMENTO (T-m)	RELACION (M/M)	# # MODOS COMBINADOS = 20	MOD 1	MOD 2	MOD 3	MOD 4	MOD 5
1	2.986	29041823.180	45.750	0.275	2.4950-02	10.6941	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	FRECUENCIA (M)	6.3559	43.5465	122.0863	239.5447	395.4501
2	2.986	29041823.180	43.250	0.525	2.4970-02	5.6072	10.6941	0.2116	26.7333	0.0106	RELACION M/M1	1.0000	0.2758	17.5947	34.5225	57.1368
3	2.986	29041823.180	43.750	0.575	2.4920-02	4.6517	15.5013	0.3265	65.3202	0.0259	PERIODO (T)	0.5055	0.1443	0.0515	0.0262	0.0159
4	2.986	29041823.180	41.250	0.825	2.4010-02	2.8621	20.3300	0.4062	111.8243	0.0443	RELACION M/71	1.0000	0.1593	0.0568	0.0290	0.0175
5	2.986	29041823.180	38.750	0.775	1.9980-02	2.2774	23.3950	0.4629	163.4076	0.0647	COEFICIENTE (C)	0.1991	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
6	2.986	29041823.180	36.250	0.725	1.7310-02	1.4135	25.6724	0.5079	219.0877	0.0863	RESP. ESPECTRAL	175.29-04	894.70-06	114.10-06	296.39-07	108.20-07
7	2.986	29041823.180	33.750	0.575	1.5550-02	1.9124	27.0860	0.5339	275.3157	0.1089	F. PARTICIPACION	1.511	-0.767	0.413	-0.279	0.191
8	2.986	29041823.180	31.250	0.525	1.3810-02	0.9202	29.9903	0.5737	332.8779	0.1317	RESP. LAM. KARIMO	266.00-04	487.20-06	471.60-07	799.60-08	204.40-08
9	2.986	29041823.180	28.750	0.575	1.2110-02	0.5893	29.9185	0.5919	392.2297	0.1552	MASA EFECTIVA	36.533	11.244	3.866	1.976	1.196
10	2.986	29041823.180	26.250	0.525	1.0430-02	1.0262	30.5079	0.6036	449.0757	0.1777	INFLUENCIA (X)	61.34	19.83	4.47	3.31	2.00
11	2.986	29041823.180	23.750	0.475	0.8630-03	3.5941	31.5341	0.6239	508.4641	0.2012	ACUMULADO (Z)	61.34	80.16	86.64	89.95	91.95
12	2.986	29041823.180	21.250	0.425	7.3530-03	2.4378	35.1282	0.6950	572.1743	0.2264	Coeficiente Sismico (Al-ZUSC1/Rd) = 0.066					
13	2.986	29041823.180	18.750	0.375	5.9310-03	2.0649	37.5660	0.7432	632.1205	0.2501						
14	2.986	29041823.180	16.250	0.325	4.6150-03	1.6199	39.6300	0.7841	691.2350	0.2733						
15	2.986	29041823.180	13.750	0.275	3.4230-03	2.8610	41.7500	0.8161	747.6491	0.2958						
16	2.986	29041823.180	11.250	0.225	2.3370-03	2.0549	43.8110	0.8668	802.0524	0.3174						
17	2.986	29041823.180	8.750	0.175	1.4870-03	2.1219	45.6658	0.9074	869.5775	0.3516						
18	2.986	29041823.180	6.250	0.125	7.8560-04	2.0536	47.9876	0.9494	963.0254	0.3890						
19	2.986	29041823.180	3.750	0.075	2.9280-04	1.9510	50.0412	0.9900	1046.9121	0.4317						
20	2.986	29041823.180	1.250	0.025	3.3670-05	1.8213	51.9922	1.0284	1209.7115	0.4787						
BASE				0.000	0.000E+00	0.0000	53.8135	1.0647	1573.4945	0.5039						

4) CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE CADA MODO DE VIBRACION

2) menos que los listados que se obtiene al ejecutar el programa de cómputo confeccionado para este fin.

De la misma manera, para utilizar el método estático propuesto, fue necesario calcular los periodos fundamentales de vibración, el valor del parámetro característico ξ y la relación de periodos $T1/Ts$. A continuación mostramos los cálculos efectuados:

1) Chimenea de Sección Uniforme

$$T1 = 0.91 \text{ seg (ver figura 22)}$$

$$\xi = 1.00 \cdot 1.00 = 1.00$$

$$\frac{T1}{Ts} = \frac{0.91}{0.30} = 3.03$$

2) Chimenea de Sección Variable

$$T1 = 2.12 \text{ seg (ver figura 22)}$$

$$\xi = 0.50 \cdot 0.25 = 0.125$$

$$\frac{T1}{Ts} = \frac{2.12}{0.30} = 7.07$$

Una vez conocidas las características fundamentales de cada una de ellas, podremos encontrar en el Cuadro 29, los coeficientes para calcular las Fuerzas Cortantes y los Momentos Flectores correspondientes a cada una de las chimeneas presentadas.

5.2.2 Comparación de las Respuestas Sísmicas Calculadas

En la figura 45 se muestra la comparación gráfica de las respuestas sísmicas de ambas chimeneas:

$$\xi = 1.00 \quad \text{y} \quad \xi = 0.125$$

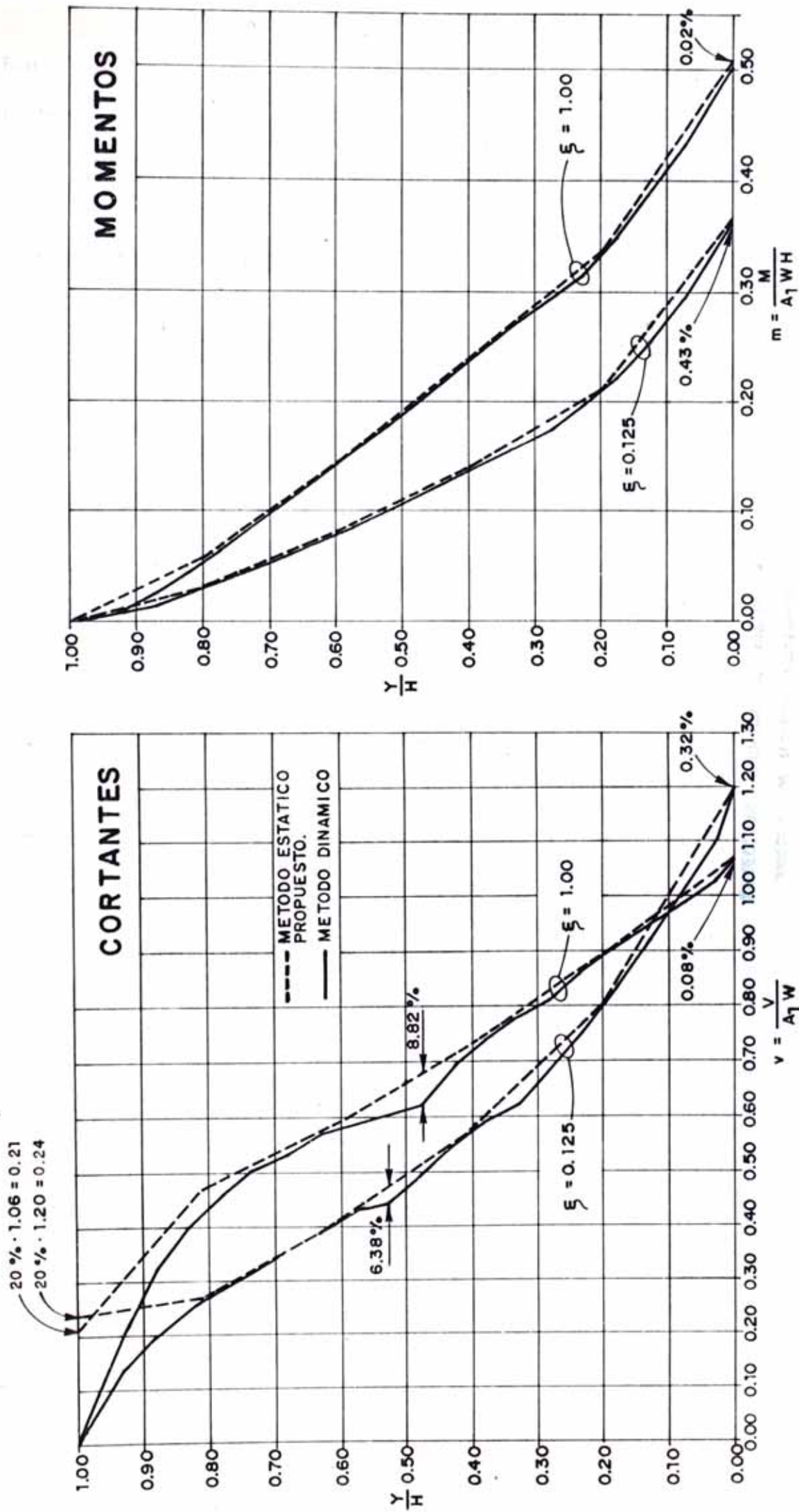
Para fines didácticos, decidimos comparar los cortantes y momentos adimensionales, calculados por los dos métodos de análisis.

Podemos apreciar que las curvas que corresponden al método estático, son en todo momento envolventes de las curvas obtenidas por el método dinámico. De esta manera, aseguramos que el método propuesto sea lo suficientemente conservador para calcular las respuestas sísmicas necesarias en el diseño de cualquier chimenea.

Notemos que la curva que corresponde a las fuerzas cortantes, comienza en la parte alta con un valor inicial debido a la carga concentrada, cuyo valor es el 20% del cortante en la base (ver Item 4.2).

Los errores encontrados en la base, tanto para las Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores de ambas chimeneas son iguales a 0.08% y 0.02% para $\xi = 1.00$, 0.32% y 0.43% para $\xi = 0.125$.

FIG. 45 COMPARACION GRAFICA DE LAS RESPUESTAS SISMICAS SEGUN EL METODO ESTATICO PROPUESTO Y EL METODO DINAMICO



Por lo tanto concluimos que con el método propuesto podemos calcular las respuestas sísmicas, obteniendo resultados que son en todo momento satisfactorios, debido a que la magnitud de los errores encontrados son prácticamente despreciables.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación se tomaron como base las siguientes hipótesis:

- 1) La Estructura Continua tipo chimenea, consiste básicamente en un elemento en voladizo de sección circular hueca con características geométricas variables con la altura.

Se considera en su interior un recubrimiento refractario de espesor constante, cuya participación en el análisis se manifiesta por incrementar la masa de la estructura, no alterando en ningún momento la rigidez que posee debido al concreto armado.

- 2) El análisis dinámico fue realizado considerando que la chimenea se comporta en el rango elástico y que se encuentra perfectamente empotrada en la base.

- 3) Para poder utilizar los métodos aproximados presentados, fue necesario discretizar a la chimenea modelandola como un sistema conformado por una serie de masas concentradas.

Dividiendo a la estructura en tramos de igual altura, se calculó la masa de cada uno de ellos ubicándolas en su centro de gravedad correspondiente.

CONCLUSIONES

- 1) Con la finalidad de determinar un método de análisis aproximado que logre satisfacer las exigencias que se obtiene empleando un método exacto como el de los elementos continuos, se efectuó la comparación de cada uno de ellos encontrándose una buena concordancia en las frecuencias circulares de los 13 primeros modos de vibración de un total de 20 modos considerados.

Se escogió el Método Matricial por poseer mejores cualidades que los aproxima muy bien al Método de los Elementos Continuos, aspecto que adolece el Método de Myklestad ya que además de no tener buena aproximación en el cálculo de las frecuencias circulares correspondientes a modos superiores (mayor a 13 modos), el tiempo que demora en calcular empleando un programa de cómputo es demasiado largo.

- 2) Utilizando el Método Matricial escogido, se encontró que cualquier chimenea puede ser idealizada como un sistema equivalente conformado por tan solo 10 masas concentradas.

Los errores máximos encontrados en la base tanto para las Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores son iguales a 1.2% y 0.3%, mientras que para los Periodos Fundamentales de Vibración se obtuvo 3.3% de error máximo, los cuales se determinaron comparándolos con los

resultados hallados al tomar un total de 20 masas concentradas (número suficiente para considerar los resultados como exactos).

Podemos apreciar que considerando a la estructura idealizada con 3 masas concentradas, los resultados obtenidos son razonablemente aproximados encontrándose un error máximo en la base igual al 2.2% para los momentos flectores, permitiendo esta ventaja realizar cálculos manuales para encontrar sus características dinámicas fundamentales.

- 3) El R.N.C (17) recomienda, para el cálculo de las respuestas sísmicas, combinar todos aquellos modos de vibración que logren alcanzar una Influencia Acumulado mayor o igual al 90%.

Tomando en cuenta esta recomendación, se encontró que es suficiente combinar las respuestas correspondientes a los 10 primeros modos de vibración de cualquier chimenea discretizada con un total de 20 masas concentradas.

La mínima influencia acumulada alcanzada es igual al 90.7%, mientras que los errores máximos obtenidos en la base para las fuerzas cortantes y momentos flectores son iguales a 10.3% y 0.5%, los cuales fueron encontrados al compararlos con las respuestas sísmicas correspondientes a la combinación de sus 20 modos de vibración.

Podemos apreciar que considerando las respuestas sísmicas correspondientes a los 5 primeros modos de vibración, los resultados obtenidos son razonablemente aproximados, encontrándose un error máximo en la base igual a 2.2% para los momentos flectores (que son los que gobiernan el diseño) y una influencia acumulada del 82.2%. Estos resultados parecen indicar que para el cálculo de las respuestas sísmicas en estructuras continuas tipo chimeneas, bastará con tomar aquellos modos de vibración cuya influencia acumulada logre superar el 80% y no el 90% que se recomienda.

- 4) El Periodo Fundamental de Vibración se puede calcular empleando la siguiente expresión:

$$T_1 = f \cdot \frac{1.2493 \cdot H^2}{\sqrt{(Ri^2 + \frac{ei^2}{4}) \cdot E}} \cdot \left[\frac{W}{W_e} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{seg}$$

Los valores de f se muestran en la figura 22. El error máximo que se observó entre los valores de T_1 calculados con la fórmula propuesta y el verdadero valor de T_1 obtenido mediante el método matricial es de 1.2%, cuando no se considera recubrimiento refractario ($W/W_e = 1.00$) y de 9.8% cuando se considera ($W/W_e \neq 1.00$).

- 5) Si en el análisis dinámico de una chimenea de sección circular hueca no se considera la deformación por corte, el error en la evaluación del periodo fundamental de vibración T_1 es igual a 5% para relaciones de $H/D = 4.5$

y de 2% para relaciones de $H/D = 7$, incrementándose rápidamente cuando la relación es menor a 4:5 (ver la figura C3).

Asimismo, el error que se comete al evaluar las respuestas sísmicas es igual a 2.5% para relaciones de $H/D = 4.5$ y de 1.5% para relaciones de $H/D = 7$, disminuyendo a medida que la relación aumenta (ver la figura C4).

- 6) Cualquier chimenea queda expresada por el valor que adopta el parámetro característico siguiente:

$$\xi = \frac{r_s \cdot e_s}{r_i \cdot e_i}$$

para iguales valores de " ξ ", las respuestas sísmicas que se obtienen son sensiblemente parecidas (ver Item 4.1.1).

- 7) El Método Estático Simplificado Propuesto en esta tesis da valores para las fuerzas cortantes y momentos flectores, entre 0.08% - 0.32% y 0.02% - 0.43% superiores a los obtenidos mediante un análisis dinámico empleando el Método Matricial escogido (ver figura 45).
- 8) Como una aplicación del Método Estático Simplificado Propuesto, se encontró que es posible analizar chimeneas que posean en el extremo superior una masa concentrada equivalente a un porcentaje de la masa total que tendría al estar libre de su influencia.

En el Anexo E se detalla el procedimiento para llevar a cabo el análisis, consistiendo su metodología en una superposición de efectos.

En el Cuadro E1 se encuentran los errores que se cometen al calcular las respuestas sísmicas empleando el Método Propuesto, comparándolos con los obtenidos empleando el Método Matricial luego de analizar la chimenea como un todo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Julio Rivera Feijoo, Victor Fernández-Dávila Gonzales,
"COMPORTAMIENTO SISMICO DE CHIMENEAS".
VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
Ancash-Huaraz.
Perú 1988
- 2.- Julio Rivera Feijoo, Victor Fernández-Dávila Gonzales,
"PLANTEAMIENTO DE NORMAS PARA EL ANALISIS SISMICO DE
CHIMENEAS".
VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
Ancash-Huaraz.
Perú 1988
- 3.- Roberto Montes Gómez, "DISEÑO SISMICO DE CHIMENEAS".
Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería
Estructural.
México 1967.
- 4.- Julio Rivera Feijoo, "DISEÑO SISMICO DE RESERVORIOS
ELEVADOS CON ESTRUCTURA TUBULAR DE SOPORTE".
Primer Premio, Concurso Nacional de Ingeniería Civil.
Lima, Perú 1986.
- 5.- Aurel A. Beles, Mihail D. Ifrin, A. Garcia Yague,
"ELEMENTOS DE INGENIERIA SISMICA"
Ediciones Omega S.A.
Barcelona 1975.

- 6.- F. Lafita Babia, H. Mata Cortés, "INTRODUCCION A LA TEORIA DE VIBRACIONES MECANICAS".
Barcelona 1968.
- 7.- Wendy Taniwangsa, Juan W. Chávez Z., "ANALISIS MODAL DE SISTEMAS DE MASA DISTRIBUIDA".
IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
Lambayeque-Chiclayo
Perú 1982.
- 8.- Samuel K. Clark, "DINAMICA DE LOS ELEMENTOS CONTINUOS".
Editorial Reverté S.A.
1975
- 9.- Odone Belluzi, "CIENCIA DE LA CONSTRUCCION IV"
Aguilar, S.A. de Ediciones.
Madrid 1971.
- 10.- Sheldon Cherry, "DYNAMICS OF STRUCTURES"
Earthquake Engineering Course.
International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.
Tokio 1968.
- 11.- William Thomsom, "VIBRATION THEORY AND APPLICATIONS".
Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
USA 1965.
- 12.- R. W. Clugh, J. Penzien, "DYNAMICS OF STRUCTURES".
Mc. Graw Hill, Inc.
USA 1975.

- 13.- Hugo Scaletti Farina, "APUNTES DE CLASE DEL CURSO DE METODOS NUMERICOS".
Escuela de Post-Grado.
Universidad Nacional de Ingeniería.
Lima-Perú.
- 14.- Wadi S. Rumman, "MODAL CHARACTERISTICS OF LINEARLY TAPERED REINFORCED CONCRETE CHIMNEYS"
ACI Journal, technical paper
USA, July-August 1985.
- 15.- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 307-79
- 16.- Robert L. Wiegell, "EARTHQUAKE ENGINEERING"
Prentice-Hall.
USA 1970.
- 17.- Cámara Peruana de la Construcción, "REGLAMENTO NACIONAL DE CONSTRUCCIONES".
Quinta Edición. Enero 1987.
Lima, Perú.
- 18.- S. Timochenko, D. H. Young, "VIBRATION PROBLEMS IN ENGINEERING"
John Wiley & Sons, Inc.
USA 1974.
- 19.- Biaggio Arbulú, "ANÁLISIS ESTRUCTURAL"
Universidad Nacional de Ingeniería
Departamento de Estructuras y Construcción
Lima - Perú 1970