

EJEMPLO DE APLICACIÓN 7: Cálculo de presiones producidas por el viento sobre una torre de telecomunicaciones

I) Descripción del problema

Se desea obtener las presiones que el viento produce en una torre de telecomunicaciones que se ubica en la ciudad de Toluca, Estado de México. La altura sobre el nivel del mar del sitio es de 2680 metros y tiene una temperatura media anual de 13.4°C. El terreno en las zonas aledañas corresponde a granjas con pocas obstrucciones, con una topografía local plana. La geometría y dimensiones generales de la torre se muestran en la Figura III.35. Como puede apreciarse, se trata de una torre de sección triangular equilátera de 36 m de altura, con sección transversal variable, desde un ancho en la base de 2.10 m, hasta 1.0 m en la parte superior. En la cara frontal se tiene una cama guía formada por ángulos de lados iguales de 1 1/2"x 3/16" sobre la cual se apoyan doce cables alimentadores o "feeders" con un diámetro exterior de 2.819 cm. Sobre la cara posterior izquierda se ubica una escalera formada de ángulos de la misma geometría que la cama guía. Los detalles de la cama guía y de la escalera se aprecian en la Figura III.35. Tanto la cama guía con sus cables, como la escalera, se desarrollan en toda la altura de la torre. Cuenta además con dos antenas tipo tambor en los niveles 20.25 m y 32.05 m. Los diámetros de las antenas son de 60 cm y 70 cm y sus pesos de 31.0 kg y 38.0 kg, respectivamente.

II) Procedimiento de solución

Los incisos, tablas y figuras citados en este ejemplo se refieren al **Tomo de Recomendaciones**.

1) Clasificación de la estructura

La torre es parte importante de un proceso que requiere mantener la comunicación, por lo que, según su importancia, la estructura pertenece al Grupo A (**inciso 4.1.3**).

La torre tiene una relación de esbeltez $\lambda = h/b = 36/1.55 = 23.23 > 5$, por lo que, según su respuesta ante la acción del viento la estructura es Tipo 2 (**inciso 4.1.4**).

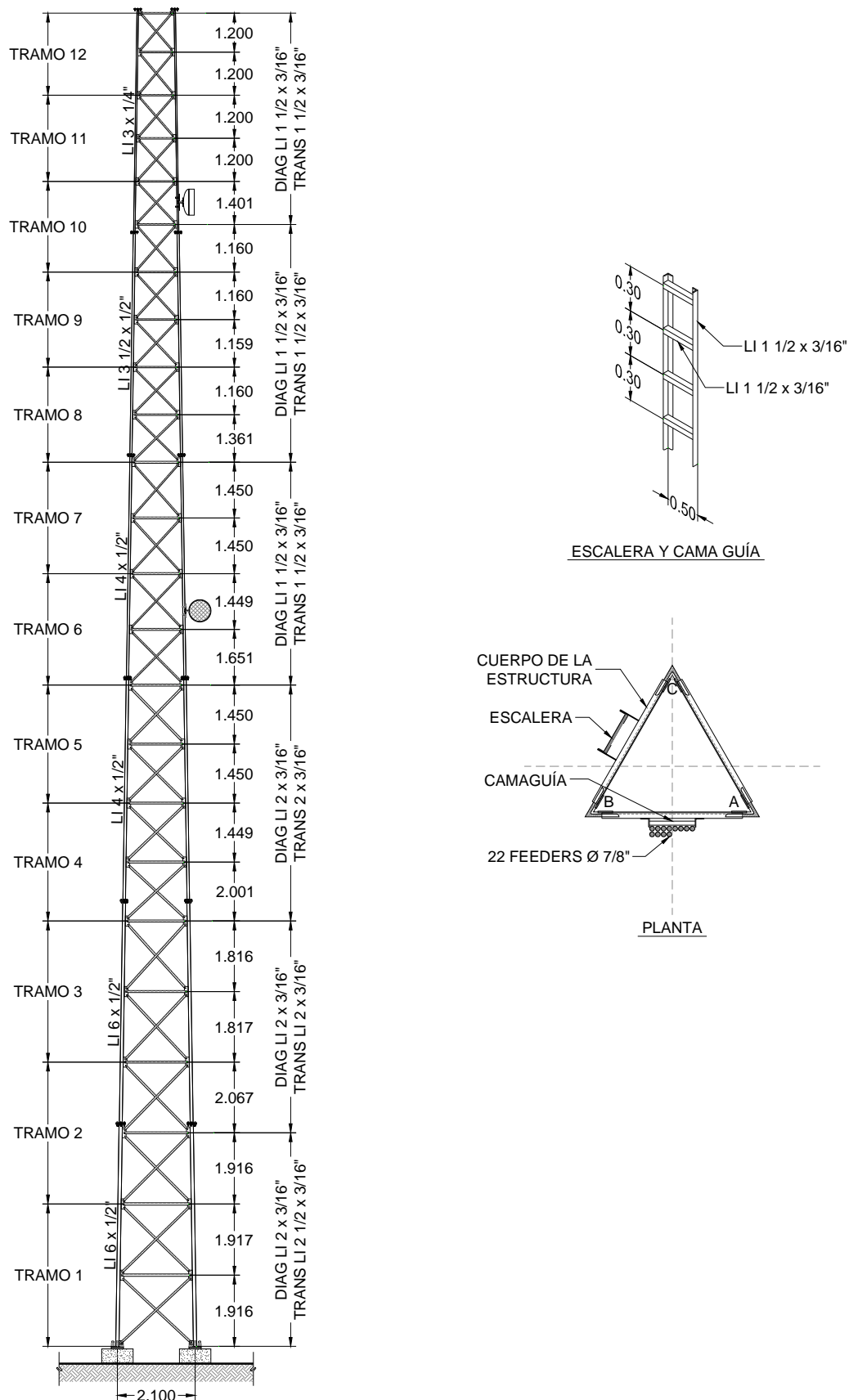


Figura III.35 Geometría y contenido de la torre de telecomunicaciones en estudio.

2) *Determinación de la velocidad básica de diseño*

La velocidad básica de diseño depende de varios parámetros (**inciso 4.2**); éstos se calculan como se indica a continuación.

2.1) *Categoría del terreno*

De acuerdo con los datos, el terreno corresponde a la Categoría 2, Tabla 4.2.1.

2.2) *Velocidad regional*

A partir de la importancia de la estructura, debe emplearse una velocidad de viento con un periodo de retorno de 200 años. La velocidad regional que corresponde a la ciudad de Toluca, Estado de México, tomada de la Tabla C.1 del **Apéndice C**, es:

$$V_R = 120 \text{ km/h}$$

2.3) *Factor de topografía, F_T (**inciso 4.2.4**)*

Puesto que la torre de telecomunicaciones se desplantará en terreno plano, y considerando que el terreno tiene una pendiente menor que 5%, se emplea un factor de corrección por topografía de $F_T = 1.0$ (Tabla 4.2.4).

3) *Selección del procedimiento para determinar las acciones por viento*

Según el **inciso 4.1.5**, si la clasificación de la estructura en función de su respuesta ante la acción del viento es Tipo 2, los efectos del viento se evaluarán con las recomendaciones del análisis dinámico (**inciso 4.4**).

4) *Presiones y fuerzas de diseño*

En el análisis dinámico, los efectos del viento se obtienen a partir de las presiones de viento, afectadas por un factor de amplificación dinámica, que toma en cuenta las características fluctuantes del viento y las propiedades físicas y dinámicas de las estructuras. De acuerdo con el **inciso 4.4.3**, la presión en la dirección del viento se obtiene con la expresión:

$$p_z = C_p q_z$$

5) *Cálculo del factor de amplificación dinámica, F_{AD}*

Para torres de celosía autosoportadas, la fuerza dinámica equivalente se obtiene con la siguiente expresión (**inciso 4.4.5**):

$$F_{eq} = q_z C_{at} A_{ref} F_{AD}$$

El factor de amplificación dinámica, F_{AD} , se obtiene con la expresión:

$$F_{AD} = \frac{1 + 2I_v(z_s) k_p \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)} \left[\frac{C_{RG}}{C_G} \right] F_M$$

- *Factores correctivos de la forma modal, C_{RG} y C_G*

Para calcular los factores correctivos de la forma modal (**inciso 4.4.5.1**) previamente se obtiene:

$$\lambda_B = 1 - \frac{b_h}{b_0} = 1 - \frac{1.00}{2.10} = 0.5238$$

con lo que:

$$C_{RG} = \left(\frac{1 - \frac{3}{4}\lambda_B}{\alpha' + 3} \right) = \left[\frac{1 - \frac{3}{4}(0.5238)}{0.16 + 3} \right] = 0.1921$$

$$C_G = \left(\frac{1}{2\alpha' + 3} - \frac{\lambda_B}{2\alpha' + 4} \right) = \left[\frac{1}{(2)0.16 + 3} - \frac{0.5238}{(2)0.16 + 4} \right] = 0.17995$$

- *Factor de respuesta de fondo, B^2*

Primero se toma, de la Tabla 4.4.2, para terreno Categoría 2, el valor de $\bar{\alpha} = 0.52$, luego se calcula la longitud de la escala de turbulencia a la altura $z_s = 36$ m:

$$L(z_s) = 300 \left(\frac{z_s}{200} \right)^{\bar{\alpha}} = 300 \left(\frac{36}{200} \right)^{0.52} = 122.988 \text{ m}$$

con lo que el factor de respuesta de fondo:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{hb}}{L(z_s)}} = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{36(1.55)}}{122.988}} = 0.8917$$

- Factor de corrección por masa y forma modal, F_M

La frecuencia natural de vibración se calculó con un modelo tridimensional, empleando un programa comercial de análisis, considerando el peso propio de la estructura y el peso de los accesorios, obteniéndose:

$$n_{1,x} = 1.47863 \text{ Hz}$$

El factor de corrección por masa y forma modal se determina con:

$$F_M = \frac{m_{total}}{5m_r} \left[\left(0.5 \frac{b_h}{b_0} - 0.3 \right) (\lambda_m - 2) + 1.4 \right] (1 - 0.4 \ln \lambda_m)$$

en donde λ_m es el exponente de variación de la forma modal con la altura, suponiendo una variación de la forma modal de $\Phi(z) = (z/h)^{\lambda_m}$. En este ejemplo, el valor de λ_m se determinó a partir de la forma del primer modo, realizando un ajuste por el método de mínimos cuadrados, resultando

$$\lambda_m = 1.6469$$

La masa generalizada (**inciso 4.4.5.1**) se calculó con la siguiente expresión, dividiendo la torre en tramos e integrando numéricamente:

$$m_r = \int_0^h m(z) \Phi^2(z) dz = 84.408 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m} = 841.319 \text{ kg}$$

y la masa total de la torre, incluyendo accesorios y antenas, es de:

$$m_{total} = 4594.643 \text{ kg}$$

Sustituyendo valores, el factor de corrección por masa y forma modal resulta:

$$F_M = \frac{4594.63}{5(841.319)} \left\{ \left(0.5 \frac{1.00}{2.10} - 0.3 \right) (1.6469 - 2) + 1.4 \right\} [1 - 0.4 \ln(1.6469)] = 1.243$$

- *Velocidad media de diseño, V'_D*

Para los cálculos siguientes se requiere conocer el valor de la velocidad media de diseño a la altura de referencia, z_s , que es igual a la altura de la torre. Para ello, se obtiene el factor de exposición, F'_{rz} , con los parámetros para terreno Categoría 2; de la Tabla 4.4.1, **inciso 4.4.2.1**: $\bar{b} = 1.00$ y $\alpha' = 0.16$; entonces:

$$F'_{rz} = 0.702 \bar{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha'} = 0.702 (1.00) \left(\frac{36}{10} \right)^{0.16} = 0.8617$$

Aplicando lo indicado en el **inciso 4.4.2**, la velocidad media de diseño:

$$V'_D = \frac{(1.0)(0.8617)(120)}{3.6} = 28.72 \text{ m/s}$$

- *Factor de respuesta en resonancia, R^2*

Se obtendrán los valores de las variables que intervienen en la fórmula para el factor de respuesta en resonancia:

$$R^2 = \frac{\pi}{4\xi_{est,x}} S_L(z, n_{1,x}) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b)$$

Las frecuencias reducidas, η_h y η_b , se determinan con:

$$\eta_h = \frac{2n_{1,x}h}{V'_D(z)} = \frac{2(1.47863)(36)}{28.72} = 3.707$$

$$\eta_b = \frac{3.5n_{1,x}b}{V'_D(z)} = \frac{3.5(1.47863)(1.55)}{28.72} = 0.279$$

Entonces, las funciones de admitancia aerodinámica resultan en:

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{1 + \eta_h} = \frac{1}{1 + 3.707} = 0.2124$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{1 + \eta_b} = \frac{1}{1 + 0.279} = 0.7819$$

El espectro de densidad de potencia, $S_L(z, \eta_{1,x})$, evaluado a una altura z_s , y para la frecuencia fundamental de vibrar de la estructura en la dirección longitudinal es,

$$S_L(z, \eta_{1,x}) = \frac{4 \left(\frac{n_{1,x} L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)}{\left(1 + 71 \left(\frac{n_{1,x} L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)^2 \right)^{5/6}} = \frac{4 \left(\frac{(1.47863)(122.988)}{28.72} \right)}{\left\{ 1 + 71 \left(\frac{(1.47863)(122.988)}{28.72} \right)^2 \right\}^{5/6}} = 0.0335$$

por lo que el factor de respuesta resonante, considerando una relación de amortiguamiento estructural, $\zeta_{est,x}$, de 0.005, correspondiente a torres de celosía atornilladas (véase la Tabla 4.4.3):

$$R^2 = \frac{\pi}{4(0.005)} (0.0335)(0.2124)(0.7819) = 0.8739$$

- *Factor pico, k_p*

El factor pico k_p es:

$$k_p = \sqrt{2 \ln(600 \nu)} + \frac{0.60}{\sqrt{2 \ln(600 \nu)}} \geq 3.0$$

en donde:

$$\nu = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 1.47863 \sqrt{\frac{0.8739}{0.8917 + 0.8739}} = 1.04 \text{ Hz}$$

por lo tanto:

$$k_p = \sqrt{2 \ln(600 \times 1.04)} + \frac{0.60}{\sqrt{2 \ln(600 \times 1.04)}} = 3.755$$

De la Tabla 4.4.2, se toma el valor de $z_{\min} = 2 \text{ m} < z_s = 36 \text{ m} < z_{\max} = 200 \text{ m}$ y el de $\bar{d} = 0.19$ para un terreno con Categoría 2, por lo que el índice de turbulencia a la altura de referencia se obtiene como:

$$I_v(z_s) = \bar{d} \left(\frac{z_s}{10} \right)^{-\alpha'} = 0.19 \left(\frac{36}{10} \right)^{-0.16} = 0.1548$$

Finalmente, a partir de los valores obtenidos, el F_{AD} resulta:

$$F_{AD} = \frac{1 + 2(0.1548)(3.755)\sqrt{0.8917 + 0.8739}}{1 + 7(0.1548)} \left[\frac{0.1921}{0.17995} \right] 1.243 = 1.621$$

6) Fuerzas en la torre y en los accesorios

Las fuerzas equivalentes sobre diferentes tramos de la torre se obtienen con la expresión dada anteriormente, en donde el área de referencia, A_{ref} , corresponde al área de los miembros de la cara frontal del tramo considerado, proyectada perpendicularmente a la dirección del viento, A_{At} :

$$F_{eq} = q_z C_{at} A_{At} F_{AD}$$

Es importante mencionar que el factor de amplificación dinámica es el mismo para todos los tramos de la torre, sin embargo, la presión dinámica de base dependerá de la altura promedio de cada tramo.

Los coeficientes de arrastre en los tramos de la torre sin accesorios se obtienen, según se indica en el **inciso 4.3.2.12.1.1**, de la Tabla 4.3.19 por tratarse de una torre de sección triangular equilátera con miembros de lados planos.

La torre se dividió en doce tramos; las alturas superiores (z_{top}), las áreas, sólida (A_{At}) y total (A_{TOT}) que delimita cada tramo, las relaciones de solidez (ϕ) y los coeficientes de arrastre (C_{at}), se resumen en la tabla siguiente.

Coefficientes de arrastre de los tramos de la torre

Tramo	z_{top}	A_{At}	A_{TOT}	ϕ	C_{at}
1	3.833	1.993	7.825	0.255	2.480
2	7.816	1.994	7.655	0.260	2.460
3	11.449	1.809	6.560	0.276	2.396
4	14.899	1.363	5.856	0.233	2.568
5	17.799	1.189	4.641	0.256	2.476
6	20.899	1.073	4.677	0.229	2.584
7	23.799	1.005	4.110	0.244	2.524
8	26.320	0.828	3.364	0.246	2.516
9	28.639	0.768	2.923	0.263	2.448
10	31.200	0.775	3.037	0.255	2.480
11	33.600	0.698	2.664	0.262	2.452
12	36.000	0.685	2.488	0.275	2.400

Los coeficientes de arrastre de cada tramo se calcularon interpolando entre los valores de la Tabla 4.3.19; por ejemplo: para el tramo 1, la relación de solidez es:

$$\phi = \frac{1.993 \text{ m}^2}{7.825 \text{ m}^2} = 0.255$$

Los coeficientes de arrastre para torres de sección triangular equilátera, para relaciones de solidez de 0.2 y 0.3 son 2.7 y 2.3, respectivamente. Interpolando entre estos valores, para $\phi = 0.255$ se obtiene:

$$C_{at} = \frac{2.3 - 2.7}{0.3 - 0.2} (0.255 - 0.2) + 2.7 = 2.48$$

6.1) Accesorios

Las fuerzas equivalentes sobre los accesorios se toman en cuenta como se indica en el **inciso 4.3.2.12.1.2**. Esto se logra agregando su área al área proyectada de la torre, cuando se instalan simétricamente; en caso contrario, se modifica el coeficiente de arrastre de la torre, quedando como:

$$C_{ate} = C_{at} + \sum \Delta C_{at}$$

El coeficiente de arrastre adicional ΔC_{at} para cada accesorio, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta C_{at} = C_{au} K_{re} K_{in} (A_a / A_{At})$$

Los accesorios de la torre pueden verse en la Figura III.35. En la parte exterior de la cara frontal se alojan doce cables alimentadores, conocidos como “feeders”, que corren en el sentido vertical, en toda la altura de la torre. Cada uno de estos cables, considerando el recubrimiento aislante, tiene un diámetro exterior de 2.819 cm (1.11 pulgadas). Estos cables se apoyan sobre una cama guía de 50 centímetros de ancho, fabricada con ángulos de 1 1/2”x 3/16”, los perfiles transversales están colocados a cada 30 centímetros. En la cara posterior izquierda de la torre se ubica una escalera con las mismas características que la cama guía. Debido a las características físicas de los accesorios y su ubicación, pueden agruparse en tres tipos de accesorios: cama guía, cables alimentadores y escalera. Esto es porque, aunque la cama guía y la escalera son iguales, se ubican en diferentes caras de la torre, por lo que tienen

diferente ángulo de incidencia del viento. A continuación se ejemplifica el cálculo de ΔC_{at} de estos tres grupos de elementos en el primer tramo, suponiendo que el viento incide en la dirección perpendicular a la cara frontal de la torre.

Cables alimentadores (*feeders*)

Los cables tienen una sección transversal circular. Según la Tabla A.1 del **Apéndice A**, a las secciones circulares les corresponde un coeficiente de arrastre $C_{au} = 1.2$.

El factor de corrección por relación de esbeltez, K_{re} , deberá obtenerse de la Tabla A.4 en el **Apéndice A**, en donde por tratarse de elementos muy largos, con una relación de esbeltez mayor que 40, $K_{re} = 1.0$.

Como el viento incide sobre la cara frontal ($\theta_a = 0^\circ$) y los cables se encuentran en la parte exterior de dicha cara, el factor de corrección por interferencia, es:

$$K_{in} = [1.5 + 0.5 \cos 2(\theta_a - 90^\circ)] \exp[-1.8(C_{at}\phi)^2]$$

$$K_{in} = [1.5 + 0.5 \cos 2(0^\circ - 90^\circ)] \exp[-1.8(2.48 \times 0.255)^2] = 0.487$$

El área expuesta de los cables en el tramo 1 es de:

$$A_a = 12 \times 0.02819 \times 3.833 = 1.297 \text{ m}^2$$

con lo que:

$$\Delta C_{at} = 1.2 \times 1.0 \times 0.487 \left(\frac{1.297}{1.993} \right) = 0.38$$

Cama guía

La escalera guía se compone de perfiles ángulo de lados iguales. El coeficiente de arrastre de estos elementos, en función del ángulo de incidencia del viento se toma de la Tabla A.3 en el **Apéndice A**:

$$C_{au} = 1.8$$

como en el caso anterior, por tratarse de elementos muy largos, con una relación de esbeltez mayor que 40:

$$K_{re} = 1.0$$

como en el caso anterior, el factor de corrección por interferencia, es:

$$K_{in} = [1.5 + 0.5 \cos 2(0^\circ - 90^\circ)] \exp[-1.8 (2.48 \times 0.255)^2] = 0.487$$

El área expuesta de los ángulos de la escalera en el tramo, considerando escalones a cada 30 centímetros es de:

$$A_a = \left(2 + \frac{1}{0.3} 0.5\right) (0.0381) (3.833) = 0.535 \text{ m}^2$$

con lo que:

$$\Delta C_{at} = 1.8(1.0)(0.487) \left(\frac{0.535}{1.993}\right) = 0.235$$

Escalera

La escalera tiene la misma geometría que la cama guía. Sin embargo, el ángulo de incidencia del viento es diferente. Rigorosamente, el coeficiente de arrastre de los perfiles que componen la escalera es diferente en cada uno, debido a la posición de los ángulos. Un valor promedio, calculado en función del ángulo del viento con respecto a cada perfil, en función de la longitud de estos elementos por metro es de 1.514. No obstante, en este ejemplo se supone conservadoramente:

$$C_{au} = 1.8$$

$$K_{re} = 1.0$$

como la escalera se ubica en la cara posterior izquierda, $\theta_a = 240^\circ$, y el factor de corrección por interferencia, resulta:

$$K_{in} = [1.5 + 0.5 \cos 2(240^\circ - 90^\circ)] \exp[-1.8 (2.48 \times 0.255)^2] = 0.852$$

El área de los ángulos de la escalera es de $A_a = 0.535 \text{ m}^2$, con lo que:

$$\Delta C_{at} = 1.8(1.0)(0.852) \left(\frac{0.535}{1.993}\right) = 0.412$$

En consecuencia, el coeficiente de arrastre del tramo 1 de la torre, incluyendo los accesorios es:

$$C_{ate} = 2.48 + 0.38 + 0.235 + 0.412 = 3.507$$

Los resultados de los coeficientes obtenidos en cada tramo, para cada tipo de accesorio, se presentan en las tablas siguientes:

Tramo	Escalera						Cama guía					
	A_a (m ²)	C_{au}	K_{re}	θ_a	K_{in}	ΔC_a	A_a (m ²)	C_{au}	K_{re}	θ_a	K_{in}	ΔC_a
1	0.535	1.80	1.00	240	0.852	0.412	0.535	1.80	1.00	0	0.487	0.235
2	0.556	1.80	1.00	240	0.838	0.421	0.556	1.80	1.00	0	0.479	0.240
3	0.508	1.80	1.00	240	0.796	0.402	0.508	1.80	1.00	0	0.455	0.230
4	0.482	1.80	1.00	240	0.919	0.585	0.482	1.80	1.00	0	0.525	0.334
5	0.405	1.80	1.00	240	0.849	0.521	0.405	1.80	1.00	0	0.485	0.297
6	0.433	1.80	1.00	240	0.932	0.677	0.433	1.80	1.00	0	0.532	0.387
7	0.405	1.80	1.00	240	0.884	0.641	0.405	1.80	1.00	0	0.505	0.366
8	0.352	1.80	1.00	240	0.878	0.672	0.352	1.80	1.00	0	0.502	0.384
9	0.324	1.80	1.00	240	0.830	0.630	0.324	1.80	1.00	0	0.474	0.360
10	0.358	1.80	1.00	240	0.852	0.708	0.358	1.80	1.00	0	0.487	0.405
11	0.335	1.80	1.00	240	0.833	0.720	0.335	1.80	1.00	0	0.476	0.411
12	0.335	1.80	1.00	240	0.799	0.703	0.335	1.80	1.00	0	0.457	0.402

Tramo	Cables alimentadores						C_{ae}
	A_a (m ²)	C_{au}	K_{re}	θ_a	K_{in}	ΔC_a	
1	1.297	1.2	1.00	0	0.487	0.380	3.507
2	1.347	1.2	1.00	0	0.479	0.388	3.509
3	1.229	1.2	1.00	0	0.455	0.371	3.399
4	1.167	1.2	1.00	0	0.525	0.539	4.026
5	0.981	1.2	1.00	0	0.485	0.480	3.774
6	1.049	1.2	1.00	0	0.532	0.624	4.272
7	0.981	1.2	1.00	0	0.505	0.592	4.123
8	0.853	1.2	1.00	0	0.502	0.621	4.193
9	0.784	1.2	1.00	0	0.474	0.581	4.019
10	0.866	1.2	1.00	0	0.487	0.653	4.246
11	0.812	1.2	1.00	0	0.476	0.664	4.247
12	0.812	1.2	1.00	0	0.457	0.650	4.155

6.2) Fuerzas en la torre

Las fuerzas en cada tramo de la torre, incluyendo los accesorios, se obtienen con la siguiente expresión (**inciso 4.4.5**):

$$F_{eq} = q_z C_{ate} A_{At} F_{AD}$$

por ejemplo, en el primer tramo, la altura promedio es de

$$z = 1.9165 \text{ m,}$$

el factor de topografía, por estar en zona plana es:

$$F_T = 1.0$$

el factor de corrección por exposición, según el **inciso 4.2.3**, por estar a una altura menor que 10 metros es de

$$F_{rz} = c = 1.00$$

por lo que la velocidad de diseño es:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R = 120 \text{ km/h}$$

y la presión dinámica de base es:

$$q_z = 0.047 G V_D^2$$

considerando una altura sobre el nivel del mar de 2680 metros, la presión barométrica se obtiene interpolando entre los valores de la Tabla 4.2.5, para 2500 y 3000 msnm, siendo de 552.4 mm Hg; así, el factor de corrección para una temperatura de 13.4°C es:

$$G = \frac{0.392 \times 552.4}{273 + 13.4} = 0.756$$

$$q_z = 0.047 \times 0.756 \times (120)^2 = 511.66 \text{ N/m}^2$$

con lo que la fuerza en el primer tramo resulta ser:

$$F_{eq} = 511.66 (3.507)(1.993)(1.621) = 5797 \text{ N}$$

Si se desea conocer las fuerzas en los accesorios, bastará emplear ΔC_{at} en lugar de C_{ate} en la expresión anterior. Por ejemplo, para la cama guía:

$$F_{eq} = 511.66(0.235)(1.993)(1.621) = 388 \text{ N}$$

Las fuerzas en cada tramo y accesorio se resumen en la tabla siguiente:

Fuerzas en torre y accesorios

Tramo	z (m)	F_{rz}	V_D	q_z	C_{ate}	A_{At}	F_{eq} escalera (N)	F_{eq} cama (N)	F_{eq} feeders (N)	F_{eq} torre (N)	F_{eq} total (N)
1	1.9165	1.000	120.0	511.66	3.507	1.993	681	388	628	4099	5797
2	5.8245	1.000	120.0	511.66	3.509	1.994	696	397	642	4068	5802
3	9.6325	1.000	120.0	511.66	3.399	1.809	603	345	557	3594	5099
4	13.174	1.036	124.3	549.07	4.026	1.363	710	405	654	3115	4884
5	16.349	1.065	127.8	580.28	3.774	1.189	582	332	537	2768	4219
6	19.349	1.088	130.6	605.85	4.272	1.073	713	408	657	2722	4500
7	22.349	1.108	133.0	628.63	4.123	1.005	656	375	606	2584	4221
8	25.0595	1.125	135.0	647.32	4.193	0.828	584	334	540	2186	3643
9	27.4795	1.138	136.6	662.78	4.019	0.768	520	297	479	2020	3316
10	29.9195	1.151	138.1	677.37	4.246	0.775	603	345	556	2111	3615
11	32.4	1.162	139.5	691.32	4.247	0.698	563	322	519	1918	3323
12	34.8	1.173	140.8	704.09	4.155	0.685	550	314	508	1877	3249

7) Cálculo de las fuerzas en las antenas de microondas

Antena 1

La primera antena de microondas tiene 0.6 m de diámetro y un área de $A_a = 0.283 \text{ m}^2$.

Se ubica a una altura de $z = 20.25 \text{ m}$, con lo que el factor de corrección por exposición, según el **inciso 4.2.3** es de:

$$F_{rz} = c \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha = 1.0 \left(\frac{20.25}{10} \right)^{0.128} = 1.0945$$

y la velocidad de diseño es de:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R = 131.34 \text{ km/h}$$

por lo que la presión dinámica de base es:

$$q_z = 0.047 \times 0.756 \times (131.34)^2 = 612.9 \text{ N/m}^2$$

Como puede verse en la Figura III.35, la antena está sobre la cara principal. Como en el cálculo se está suponiendo que el viento incide sobre dicha cara, el ángulo de incidencia del viento es de cero grados y la fuerza sobre ella en la dirección del viento, corresponde a la fuerza F_{am} . El coeficiente se toma de la Tabla A.7 del **Apéndice A**, para antenas de microondas tipo tambor, en donde para cero grados es de:

$$C_a = 1.2617$$

y la fuerza en la dirección del viento se obtiene como:

$$F_{am} = q_z G_h C_a A_a$$

como se están obteniendo los efectos sobre la torre,

$$G_h = F_{AD} = 1.621$$

con lo que:

$$F_{am} = 612.9 \times 1.621 \times 1.2617 \times 0.283 = 354.7 \text{ N}$$

en este caso,

$$C_s = C_m = 0.0$$

por lo que no se tiene fuerza transversal ni momento sobre la antena.

Antena 2

La segunda antena de microondas tiene 0.7 m de diámetro y un área de $A_a = 0.385 \text{ m}^2$.

A la altura en que está ubicada, $z = 32.05 \text{ m}$, el factor de corrección por exposición, según el **inciso 4.2.3** es de:

$$F_{rz} = c \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha = 1.0 \left(\frac{32.05}{10} \right)^{0.128} = 1.1608$$

entonces, la velocidad de diseño es:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R = 139.3 \text{ km/h}$$

y la presión dinámica de base:

$$q_z = 0.047 \times 0.756 \times (139.3)^2 = 689.5 \text{ N/m}^2$$

Como puede verse en la Figura III.35, esta antena tiene un ángulo de 90° con respecto al viento cuando incide sobre la cara frontal. En este caso, la fuerza en la dirección del viento es la fuerza F_{sm} . Los coeficientes se toman de la Tabla A.7, del **Apéndice A**, que para 90° son de:

$$C_s = 0.625$$

$$C_a = -0.1094$$

$$C_m = 0.098$$

la fuerza en la dirección del viento es:

$$F_{sm} = q_z G_h C_s A_a = 689.5 \times 1.621 \times 0.625 \times 0.385 = 268.9 \text{ N}$$

y la fuerza transversal y el momento valen:

$$F_{am} = q_z G_h C_a A_a = 689.5 \times 1.621 \times (-0.1094) \times 0.385 = -47.1 \text{ N}$$

$$M_m = q_z G_h C_m A_a D_1 = 689.5 \times 1.621 \times 0.098 \times 0.385 \times 0.7 = 29.5 \text{ N-m}$$