

Guía de cálculos mecánicos y selección de estructuras

Autores:

Juan Esteban Arboleda Figueroa

Jhoan Sebastian Mojica Orozco



Guía de cálculos mecánicos y selección de estructuras



Presentación



Esta guía tiene como objeto presentar una herramienta de aprendizaje sobre los procedimientos necesarios para la selección de estructuras de concreto de media tensión, cumpliendo la normativa vigente a nivel nacional y de manera específica de la Electrificadora de Santander (ESSA).

Se busca que este documento sea de fácil entendimiento para los lectores, contiene un lenguaje sencillo, tablas, ilustraciones y un ejercicio ejemplo.

El ejercicio se desarrollará a medida que se presenten los temas, para ello, las partes del desarrollo del ejercicio se encontraran en cuadros grises.

Introducción

Los diseños de redes de distribución exigen memorias de cálculo donde se detalla la metodología y cálculos usados para la selección de los equipos y elementos de la red, con el propósito de dar cumplimiento al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

Es importante que el proceso de diseño de la red, desde la planeación hasta los cálculos y verificaciones, sean realizados de manera correcta por el diseñador, por esta razón es necesario un documento guía donde se encuentren todos los aspectos a tener en cuenta para selección de las estructuras.

En esta guía se detallará la metodología propuesta por la electrificadora de Santander (ESSA), las estructuras disponibles según sus normas y las comprobaciones necesarias para la selección de estructuras de concreto de media tensión.

Ejercicio ejemplo

En la presente página se encuentra el ejercicio ejemplo que se desarrollará a lo largo de la guía.

Se planea la construcción de una red de distribución en el municipio de Barrancabermeja - Santander, después de realizar el cálculo de conductores se obtuvieron las siguientes características sobre una de las estructuras de la línea.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA			
Ubicación	Barrancabermeja — Santander		
Altitud	75 m.s.n.m		
Temperatura media ambiente	27 °C		
Zona urbana sin efectos topográficos			
CARACTERÍSTICAS DE LA RED			
Nivel de tensión	Baja tensión		
Cambio de dirección de la línea	15°		
Vanos	Anterior	Posterior	
	25 m	25 m	
Conductores	2 x 4 (F) AWG + 4 (N) AWG		
Altura de los conductores	(N) 6.4 m	(F) 6.1 m	(F) 5.8 m
Diámetros conductores	6.360 mm		
Tensión mecánica en operación diaria	165.7113 daN		
Tensión mecánica en viento reducido	216.3053 daN		
Tensión mecánica en viento máximo	225.5590 daN		
Cantidad de aisladores	3		
Altura de los aisladores	(N) 6.4 m	(F) 6.1 m	(F) 5.8 m
Longitud de los aisladores	80 mm		
Diámetro de los aisladores	70 mm		

Teniendo en cuenta estas especificaciones, seleccionar la estructura según las características estandarizadas por la Electrificadora de Santander para el diseño del tramo de la línea de distribución.



Características de los postes de concreto

La altura de la estructura depende del nivel de tensión de la red de distribución. Según la norma [ESSA](#) para redes de baja tensión la altura mínima es de 8 metros, para redes de media tensión de valor de 13.2 kV la altura mínima es de 12 metros, finalmente para redes de 34.5 kV la altura mínima es de 14 metros. Se debe tener en cuenta que la longitud de empotramiento es del 10% de la longitud total de la estructura más 60 cm, según la NTC 1329.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Diámetro[cm]	
		Cima	Base
8	500.1	14	26
	735.5	14	26
	1029.7	19	31
10	500.1	14	29
	735.5	14	29
	1029.7	19	34
12	500.1	14	32
	735.5	16	34
	1029.7	19	37
	1323.9	20	38
14	735.5	16	37
	1029.7	19	40
	1323.9	20	41
16	1029.7	19	43
	1323.9	20	44

Fuerzas que actúan en condición normal

Se consideran todos los conductores y cables de guarda en operación normal bajo condición climática de viento promedio diario y temperatura coincidente. La estructura está sujeta a la acción simultánea de las siguientes fuerzas:

- » Fuerza por presión del viento.
- » Fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas.
- » Fuerza por cambio de dirección de la línea.

Todas las fuerzas calculadas deberán estar en Decanewtons [daN]





Fuerza por presión del viento

El viento ejerce una fuerza transversal sobre la estructura, conductores y aisladores, esta fuerza depende de la forma de los elementos y de la zona en donde se supone la ubicación de la estructura, por esta razón se deberá calcular una fuerza por presión de viento por cada elemento tipo en la estructura.

$$F_v = Q \times K_z \times K_{zt} \times V^2 \times G \times C_f \times A$$

F_{Vw} , F_{Va} , F_{Vs} : Fuerza por presión del viento conductor, aislador y estructura, respectivamente.

Q: Factor de conversión de energía cinética.

K_z : Coeficiente de exposición a la velocidad del viento.

K_{zt} : Coeficiente topográfico.

V: Velocidad básica del viento, en m/s.

G: Factor de respuesta de ráfaga.

C_f : Coeficiente de forma.

A: Área efectiva.

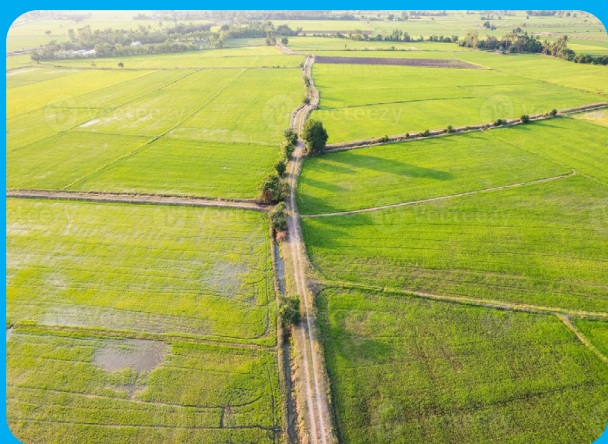
Los anteriores terminos se explicarán en paginas posteriores. Para el cálculo de esta fuerza es necesario definir categorías de exposición según la zona, los coeficientes de corrección y el área de los elementos en la estructura.

Categorías de exposición

Según la NSR 2010 los tipos de exposición del terreno se clasifican en:

Exposición B.

Corresponde a áreas urbanas y suburbanas, áreas bien arboladas, o terrenos con numerosas obstrucciones poco espaciadas con tamaño de viviendas unifamiliares e incluso algo más grandes. Se escoge la exposición B cuando las características de la zona prevalecen por 800 m o 20 veces la altura de la estructura de distribución, la que sea mayor.

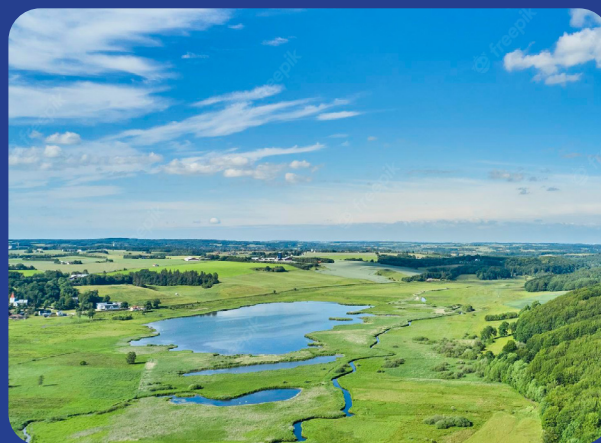


Exposición C.

Corresponde a terrenos abiertos con obstrucciones dispersas de alturas generalmente inferiores a 9 m. Incluye terrenos planos, campo abierto, granjas, pastizales expuestos al viento. Esta categoría se usa cuando las características del terreno no se ajustan a las descripciones de las demás categorías.

Exposición D.

Corresponde a áreas planas sin obstáculos y directamente expuestas a vientos provenientes de cuerpos de agua abiertos. Esta categoría incluye pantanos, salinas y superficies de hielo. Se escoge la exposición D cuando las características de la zona prevalecen por 1500 m o 20 veces la altura de la estructura, la que sea mayor.



Factor de conversión de energía cinética, Q

El factor de conversión Q convierte la energía cinética del movimiento del aire en energía potencial de presión. Se toma según la temperatura y altitud de la zona de la siguiente tabla:

Temperatura ambiente °C	Altitud sobre el nivel del mar [m]					
	0	1000	2000	2500	3000	3500
30	0.582	0.515	0.459	0.582	0.404	0.404
26	0.590	0.523	0.466	0.582	0.409	0.409
23	0.596	0.529	0.471	0.582	0.413	0.413
21	0.600	0.533	0.474	0.582	0.415	0.415
15	0.613	0.545	0.484	0.582	0.423	0.423
9	0.622	0.557	0.494	0.582	0.432	0.432
0	0.637	0.576	0.508	0.582	0.447	0.447

I. Para el ejercicio, se tiene una altitud de 75 metros sobre el nivel del mar y una temperatura ambiente de 27 °C, se toma el más cercano de la tabla, en este caso se toma el valor 0.590.

Altura efectiva, Z

La altura efectiva Z es la distancia vertical, tomada desde la base de la estructura, donde es aplicada la fuerza ejercida por la presión del viento. Para conductores y aisladores, la altura efectiva es el promedio de alturas de dichos elementos, para las estructuras se calcula con la siguiente ecuación:

$$Z_s = \frac{L - L_e}{3} \times \left[\frac{2 \times d_c + d_b}{d_c + d_b} \right]$$

Z_w, Z_a, Z_s : Altura efectiva para conductor, aislador y estructura, respectivamente.

L: Longitud total de la estructura, en metros.

L_e : Longitud de empotramiento de la estructura, en metros.

d_b : Diámetro de la base de la estructura, en centímetros.

d_c : Diámetro de la cima de la estructura, en centímetros.

2. Se considera que los aisladores y los conductores se encuentran a la misma altura, por ende, la altura efectiva es:

$$Z_w = Z_a = \frac{6.4 + 6.1 + 5.8}{3} = 6.1$$

3. Se calcula la longitud de empotramiento de la estructura, para ello primero se selecciona la estructura con las menores características posibles según el nivel de tensión, para este caso la red de baja tensión permite estructuras de 8 metros, con diámetros de 14 y 26 centímetros para la cima y la base, respectivamente:

$$L_e = (8 \times 0.1) + 0.6 = 1.4 \text{ [m]}$$

Posteriormente se calcula la altura efectiva:

$$Z_s = \frac{8 - 1.4}{3} \times \frac{2 \times 0.14 + 0.26}{0.14 + 0.26} = 2.97 \text{ [m]}$$

Coeficiente de exposición a la velocidad del viento, K_z

El coeficiente de exposición a la velocidad del viento modifica el valor de velocidad del viento, teniendo en cuenta que el viento varía según la altura debido al cambio de la fricción producido por la rugosidad del terreno. Al depender de la altura efectiva Z , se deberá calcular para cada elemento tipo. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$K_z = 2.01 \times \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}}$$

Z: Altura Efectiva.

Z_g : Altura nominal de la capa atmosférica límite.

α : Exponente para la ley potencial de la velocidad de ráfaga de 3 seg.

Los valores de Z_g y α se obtienen de la siguiente tabla, según el tipo de terreno o categoría de exposición.

Tipo de Terreno	α	Z_g [m]
B	7.0	366
C	9.5	274
D	11.5	213

4. Teniendo en cuenta que es zona urbana, se tiene una categoría de exposición B, los valores de Z_g y α son 366 y 7, respectivamente. Para los conductores y aisladores el valor del coeficiente es:

$$K_z = 2.01 \times \left(\frac{6.1}{366} \right)^{\frac{2}{7}} = 0.6239$$

Para la estructura el valor es:

$$K_z = 2.01 \times \left(\frac{2.97}{366} \right)^{\frac{2}{7}} = 0.5079$$

Factor de respuesta de ráfaga, G

El factor G es un factor de corrección de los efectos dinámicos y la falta de correlación de las ráfagas en la respuesta del viento de los componentes de la línea de distribución, en este caso también habrá que calcular un valor de G para cada elemento tipo. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{1 + 4.6 \times I_z \times B}{1 + 6.1 \times I_z}$$

G_w, G_a, G_s : Factor de respuesta de ráfaga para conductor, aislador y estructura, respectivamente.

B : Respuesta adimensional de la carga de viento de fondo cuasi estática.

I_z : Intensidad de turbulencia a altura efectiva.

El valor de E y B se calculan de la siguiente manera, para cada elemento tipo, teniendo en cuenta el valor de la intensidad de turbulencia a la altura efectiva de los conductores, aisladores y la estructura

$$I_z = c_{\text{exp}} \times \left(\frac{10}{Z} \right)^{\frac{1}{6}}$$
$$B_a = B_s = \frac{1}{1 + \frac{0.56 \times Z}{L_s}}$$
$$B_w = \frac{1}{1 + \frac{0.8 \times V_v}{L_s}}$$

B_w, B_a, B_s : Respuesta adimensional de la carga de viento de fondo cuasi estática para conductor, aislador y estructura, respectivamente.

I_{zw}, I_{za}, I_{zs} : Intensidad de turbulencia a la altura efectiva de conductor, aislador y estructura, respectivamente.

c_{exp} : Constante de intensidad de turbulencia.

L_s : Escala integral transversal de turbulencia.

Z : Altura Efectiva.

V_v : Vano viento.

Los valores de L_s y c_{exp} se toman de la siguiente tabla según la categoría de exposición.

Tipo de Terreno	c_{exp}	L_s [m]
B	0.3	52
C	0.2	67
D	0.15	76

5. Se toman los valores para L_s y c_{exp} de 52 y 0.3, respectivamente. Se calculan los valores de I_z y B:

$$I_{zw} = I_{za} = 0.3 \times \left(\frac{10}{6.1} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.3258$$

$$I_{zs} = 0.3 \times \left(\frac{10}{2.97} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.3673$$

Se tiene un valor de vano viento de 25 metros.

$$B_w = \frac{1}{1 + \frac{0.8 \times 25}{52}} = 0.7222$$

$$B_a = \frac{1}{1 + \frac{0.56 \times 6.1}{52}} = 0.9384$$

$$B_s = \frac{1}{1 + \frac{0.56 \times 2.97}{52}} = 0.969$$

Se calculan los valores de factor de respuesta de ráfaga:

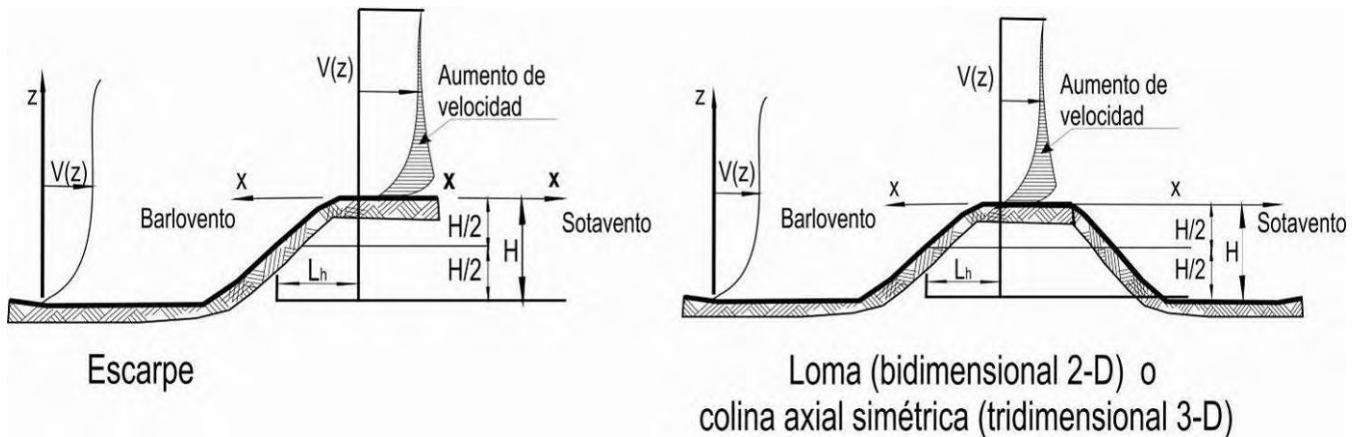
$$G_w = \frac{1 + 4.6 \times 0.3258 \times 0.7222}{1 + 6.1 \times 0.3258} = 0.697$$

$$G_a = \frac{1 + 4.6 \times 0.3258 \times 0.9384}{1 + 6.1 \times 0.3258} = 0.8055$$

$$G_s = \frac{1 + 4.6 \times 0.3673 \times 0.969}{1 + 6.1 \times 0.3673} = 0.8138$$

Coeficiente topográfico, K_{zt}

El coeficiente topográfico modifica el valor de velocidad del viento teniendo en cuenta los cambios topográficos del terreno, según la NSR-10 se producen estos cambios en escarpes y lomas.



Nota: Imagen tomada de NSR-10

El coeficiente topográfico se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_{zt} = (1 + K_1 \times K_2 \times K_3)^2$$

Los valores de K_1 , K_2 y K_3 se obtienen de la siguiente tabla:

Multiplicador Topográfico para Exposición C										
H/L_h	Multiplicador K_1			x/L_h	Multiplicar K_2		z/L_h	Multiplicar K_3		
	Loma 2-D	Escarpe 2-D	Colina Axial simétrica 3-D		Escarpe 2-D	Todos los otros casos		Loma 2-D	Escarpe 2-D	Colina Axial simétrica 3-D
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04
							0.90	0.07	0.11	0.03
							1.00	0.05	0.08	0.02
							1.50	0.01	0.02	0.00
							2.00	0.00	0.00	0.00

En caso de que las estructuras se ubiquen en zonas planas donde no hay efectos topográficos como los mencionados anteriormente, el valor de coeficiente topográfico es de 1.

6. El ejercicio especifica que no hay efectos topográficos en la zona, por ende, el valor del coeficiente topográfico es de 1.

Coeficiente de forma, C_f

El coeficiente de forma tiene en cuenta la forma, longitud y diámetro de los elementos. Se toman valores estandarizados para conductores, aisladores y estructuras de 1, 1.2 y 1.1, respectivamente.

Área efectiva, A

El área efectiva es el área expuesta al área proyectada en el plano normal a la dirección del viento. En los aisladores se tiene en cuenta un factor de 0.6 debido a la forma del mismo. Se calcula para conductores, aisladores y estructuras con las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$A_w = V_v \times \frac{d_w}{1000}$$
$$A_a = \frac{L_a}{1000} \times \frac{d_a}{1000} \times 0.6$$
$$A_s = \frac{(L - L_e) \times (d_b + d_c)}{200}$$

A_w, A_a, A_s : Área Efectiva de conductor, aislador y estructura, respectivamente.

V_v : Vano viento, en metros.

d_w, d_a : Diámetro del conductor y aislador, respectivamente, en centímetros.

L_a : Longitud del aislador, en centímetros.

L : Longitud total de la estructura, en metros.

L_e : Longitud de empotramiento de la estructura, en metros.

d_b, d_c : Diámetro de la base y cima de la estructura, respectivamente, en centímetros.

7. Se calculan las áreas efectivas de los elementos.

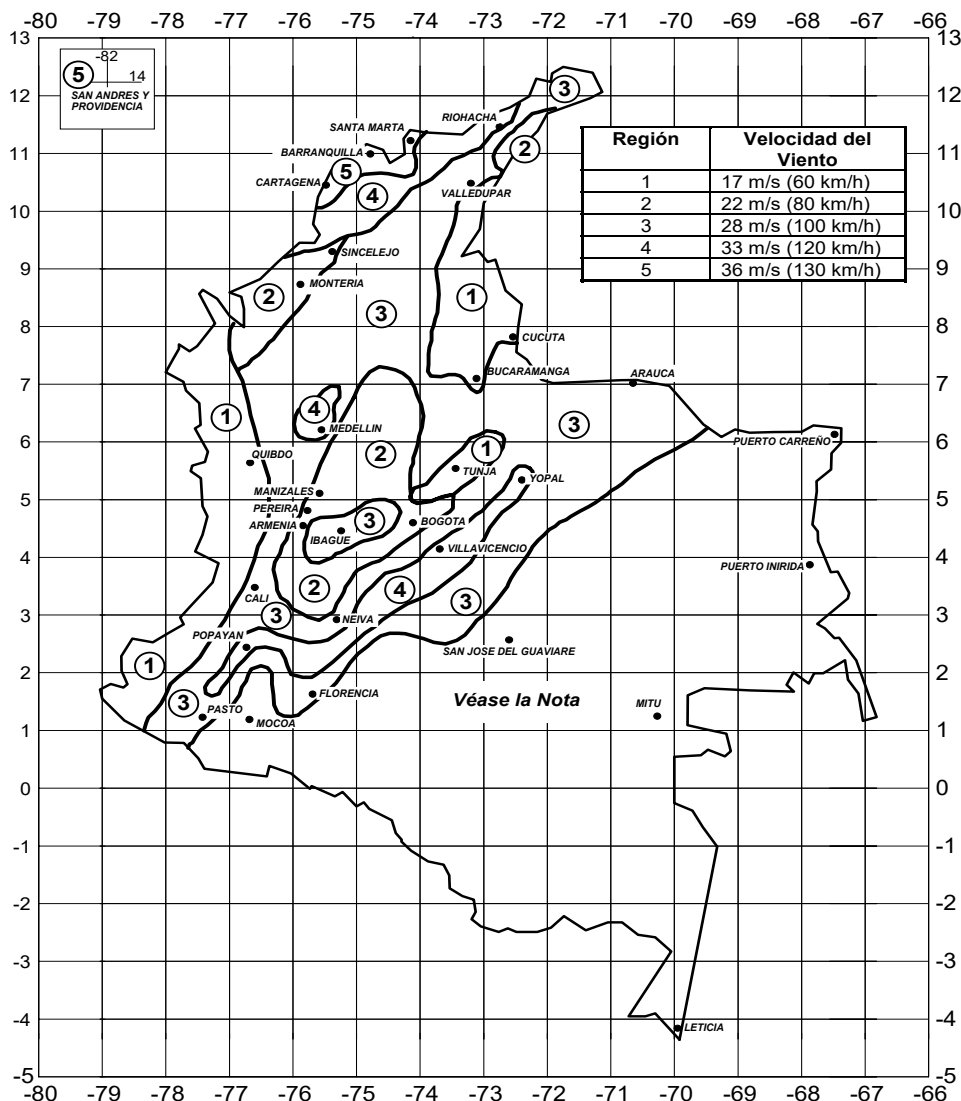
$$A_w = 25 \times \frac{6.36}{1000} = 0.159$$

$$A_a = \frac{80}{1000} \times \frac{70}{1000} \times 0.6 = 0.00336$$

$$A_s = \frac{(8 - 1.4) \times (26 + 14)}{200} = 1.32$$

Velocidad básica del viento, V

La velocidad básica de viento corresponde a la velocidad de una ráfaga de 3 segundos a una altura de 10 m por encima del suelo en un terreno de categoría de exposición C. Este valor puede ser tomado de la figura presentada por la NSR-10.



Nota: estas zonas no han sido estudiadas y se recomienda ser conservador al evaluar las fuerzas eólicas que puedan Presentarse en ellas. Mientras no se disponga de datos confiables se calcularán con base en una velocidad de 28 m/s (100 km/h).

Nota: Imagen tomada de NSR-10

8. Para la zona de Barrancabermeja - Santander corresponde un valor de 17 m/s para la velocidad básica del viento.

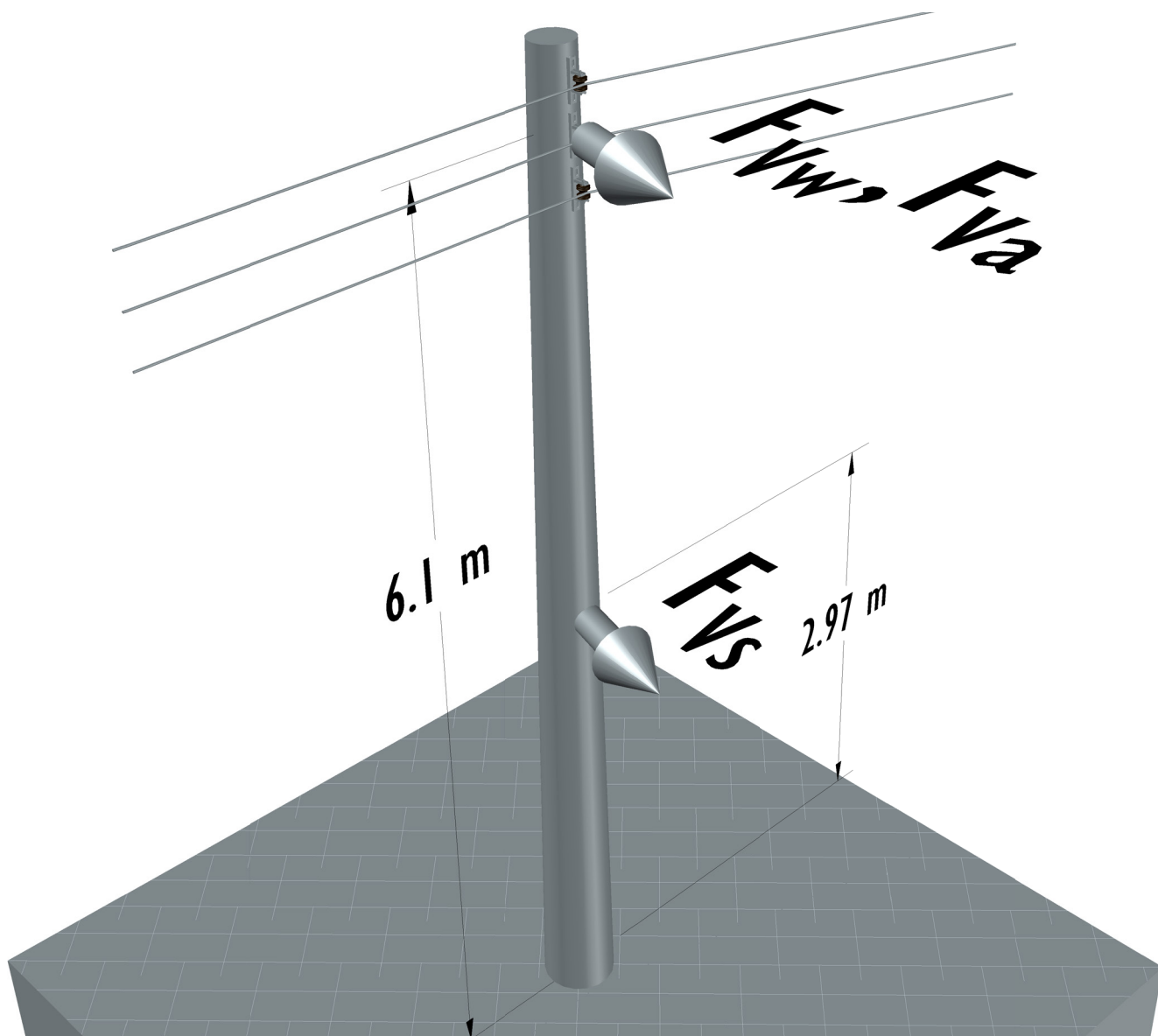
Nota: El resultado del calculo de fuerzas por presión de viento se dará en Newtons, se debe pasar el resultado a Decanewtons.

9. Con los valores anteriormente calculados se determinan los valores de fuerza por presión del viento sobre los elementos.

$$F_{Vw} = 0.59 \times 0.6239 \times 1 \times 17^2 \times 0.697 \times 1 \times 0.159 = 11.7895 = 1.1789 \text{ [daN]}$$

$$F_{Va} = 0.59 \times 0.6239 \times 1 \times 17^2 \times 0.8055 \times 1.2 \times 0.00336 = 0.3455 = 0.0345 \text{ [daN]}$$

$$F_{Vs} = 0.59 \times 0.5079 \times 1 \times 17^2 \times 0.8138 \times 1.1 \times 1.32 = 102.3322 = 10.2332 \text{ [daN]}$$





Fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas

Se tiene en cuenta la carga por tensión mecánica de los conductores, de manera longitudinal, cuando las tensiones de los vanos adyacentes no tengan igual magnitud, como en estructuras desniveladas, terminales y de anclaje.

$$F_{TW} = |T_{H1} - T_{H2}|$$

T_{H1} : Tensión mecánica vano anterior, en Decanewtons.

T_{H2} : Tensión mecánica vano posterior, en Decanewtons.

Los valores de tensión mecánica de conductores se calculan en el análisis de conductores para la hipótesis de condición diaria.



Fuerza por cambio de dirección de la línea

En los cambios de dirección de una línea, se genera una fuerza en dirección transversal como resultado de la suma de tensiones de los vanos adyacentes.

$$F_{T\theta} = (T_{H1} + T_{H2}) \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Cuando se tiene un cambio de dirección en la línea, la fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas se multiplica por un factor coseno.

$$F_{TW} = |T_{H1} - T_{H2}| \times \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

T_{H1} : Tensión mecánica vano anterior, en Decanewtons.

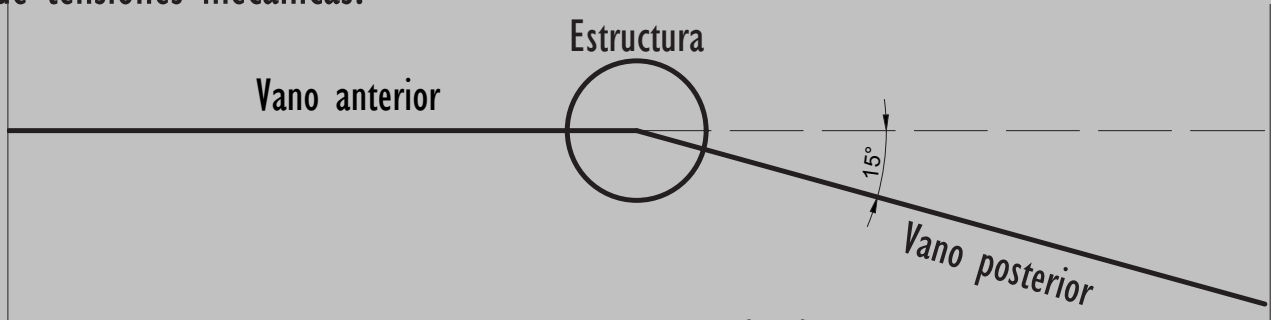
T_{H2} : Tensión mecánica vano posterior, en Decanewtons.

θ : Ángulo de desviación de la línea.

10. Se calcula la fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas. En este caso las tensiones son iguales para ambos vanos de la estructura.

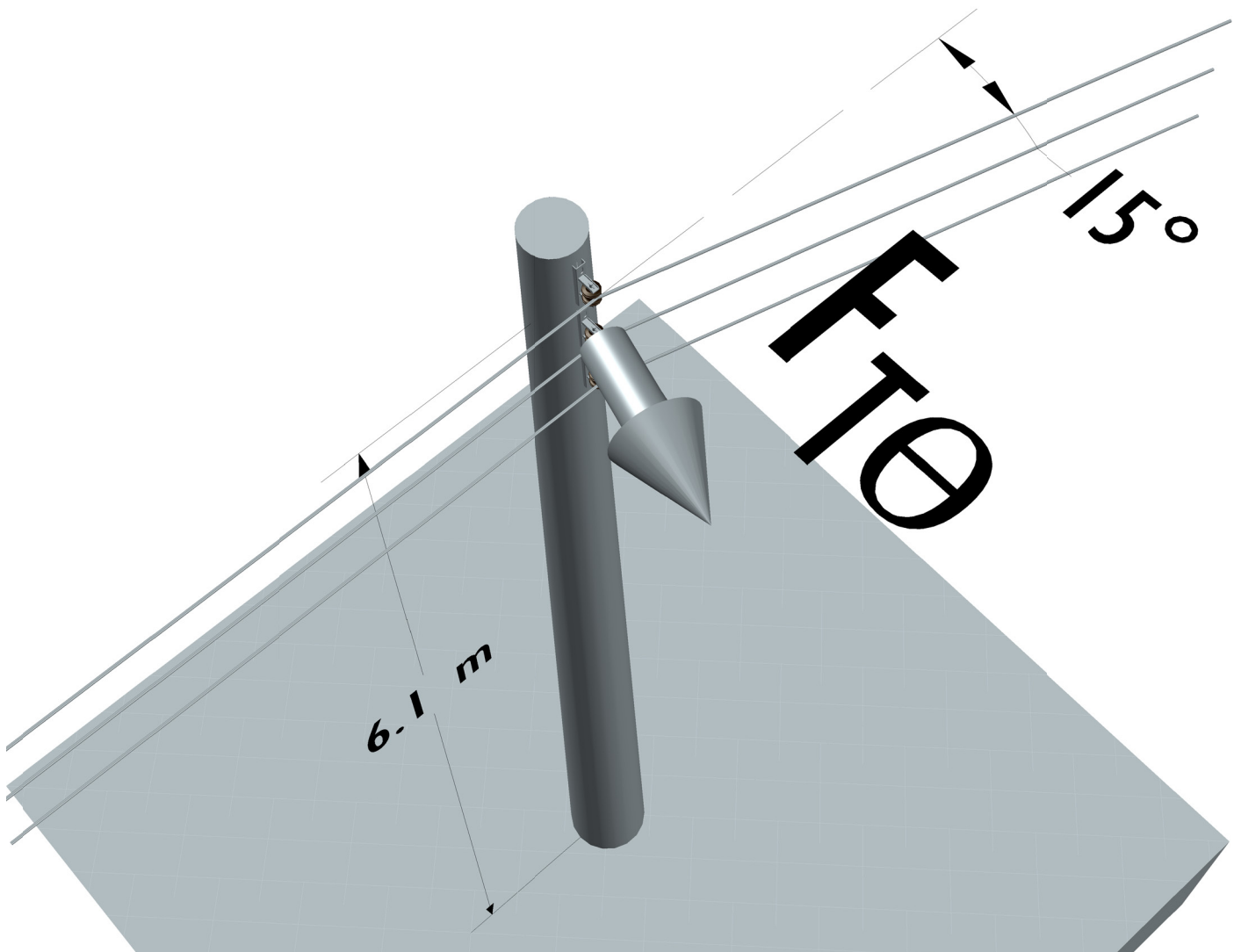
$$F_{TW} = \text{abs}(165.7113 - 165.7113) = 0 \text{ [daN]}$$

11. Teniendo en cuenta el ángulo de desviación de la línea, se calculan la fuerza por cambio de dirección y se le aplica el factor coseno a la fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas.



$$F_{T\theta} = (165.7113 + 165.7113) \times \sin\left(\frac{15}{2}\right) = 43.2593 \text{ [daN]}$$

$$F_{TW} = 0 \times \cos\left(\frac{15}{2}\right) = 0$$



Fuerzas que actúan en condición anormal

Se analizan las posibles contingencias que se puedan presentar sobre la estructura, así como también cargas en el montaje de la estructura. Se tiene en cuenta la rotura de un conductor o el desequilibrio de tensiones de hasta el 50%.

- » Fuerza por conductor roto.
- » Fuerza por desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas.



Fuerza por conductor roto

Se asume un conductor roto en cualquier fase, las demás fases y cable de guarda sanos o el cable de guarda roto, las fases sanas en condición climática viento reducido y temperatura coincidente. El cable sano del vano adyacente genera una tensión máxima sobre la estructura.

$$F_{WR} = |T_{WR}|$$

T_{WR} : Tensión mecánica del conductor adyacente al conductor roto.

En caso de tener tensiones mecánicas desiguales en los vanos adyacentes, se asume que el cable roto es el de menor tensión mecánica entre los dos vanos y el más alto.

12. Teniendo los datos de tensión en condición de viento reducido se calcula la fuerza por conductor roto, en este caso las tensiones mecánicas son iguales en los dos vanos adyacentes a la estructura.

$$F_{WR} = 216.3053 \text{ [daN]}$$

Fuerza por desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas

Se considera 50% de desequilibrio en las tensiones de todos los cables en la estructura en condición de viento máximo y temperatura coincidente.

$$F_{T50\%} = 0.5 \times |T_{HVM}|$$

T_{HVM} : Tensión mecánica del conductor en condición de viento máximo.

En caso de tener tensiones mecánicas desiguales en los vanos adyacentes, se asume la de mayor tensión mecánica entre los dos vanos adyacentes a la estructura.

13. Teniendo los datos de tensión en condición de viento máximo se calcula la fuerza por desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas.

$$F_{T50\%} = 0.5 \times 225.5590 = 112.7795 \text{ [daN]}$$

Momentos de fuerza sobre las estructuras

Las fuerzas en condición normal y anormal generan momentos de fuerza, dichos momentos son soportados por el momento resistente propio de la estructura.

- » Momentos generados por fuerzas.
- » Momento resistente.





Momentos generados por fuerzas

Se asume que los momentos son aplicados en la altura efectiva, calculada en el análisis de fuerza por presión del viento. Para aisladores y conductores en el promedio de altura de los elementos, para estructuras en el centroide.

$$M = F \times Z$$

Cuando se tiene más de un cable o aislador, la fuerza es multiplicada por la cantidad de aisladores o cables en la estructura.

$$M = N \times F \times Z$$

Momento por presión del viento, M_v

Se debe calcular un momento de presión del viento generado por la estructura y por cada elemento tipo en ella.

$$M_{Vs} = F_{Vs} \times Z_s$$

$$M_{Vw} = N_w \times F_{Vw} \times Z_w$$

$$M_{Va} = N_a \times F_{Va} \times Z_a$$

M_{Vw} , M_{Va} , M_{Vs} : Momento por presión del viento en conductor, aislador y estructura, respectivamente.

N_w , N_a : Número de conductores y aisladores en la estructura, respectivamente.

F_{Vw} , F_{Va} , F_{Vs} : Fuerza por presión del viento en conductor, aislador y estructura, respectivamente.

Z_w , Z_a , Z_s : Altura efectiva de conductor, aislador y estructura, respectivamente.

14. Con los valores de fuerza por presión de viento calculados y teniendo en cuenta que el número de aisladores y cables en la estructura son 3, se calculan los momentos de fuerza por presión de viento.

$$M_{Vs} = 10.2332 \times 2.97 = 30.3926 \text{ [daN m]}$$

$$M_{Vw} = 3 \times 1.1789 \times 6.1 = 21.5738 \text{ [daN m]}$$

$$M_{Va} = 3 \times 0.0345 \times 6.1 = 0.6313 \text{ [daN m]}$$

Momento por desequilibrio de tensiones mecánicas, M_{TW}

Se tiene en cuenta el número de pares de conductores adyacentes o el número de fases en la estructura.

$$M_{TW} = N_F \times F_{TW} \times Z_w$$

N_F : Número de pares de conductores adyacentes o número de fases.

F_{TW} : Fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas.

Z_w : Altura efectiva de los conductores, en metros.

15. Se calcula el momento por desequilibrio de tensiones mecánicas, en este caso el no hay desequilibrio por tensiones, por ende, el valor del momento es 0.

$$M_{TW} = 3 \times 0 \times 6.1 = 0 \text{ [daN m]}$$

Momento por cambio de dirección de la línea, $M_{T\theta}$

$$M_{T\theta} = N_F \times F_{T\theta} \times Z_w$$

N_F : Número de pares de conductores adyacentes o número de fases.

$F_{T\theta}$: Fuerza por cambio de dirección de la línea.

Z_w : ALtura efectiva de los conductores, en metros.

16. Se calcula el momento por cambio de dirección de la línea.

$$M_{T\theta} = 3 \times 43.2593 \times 6.1 = 791.6452 \text{ [daN m]}$$

Momento por rotura de conductor, M_{WR}

Teniendo en cuenta la altura del conductor adyacente al conductor roto, se calcula el momento por rotura de conductor.

$$M_{WR} = F_{WR} \times Z_{WR}$$

F_{WR} : Fuerza por conductor roto.

Z_{WR} : Altura del conductor adyacente al conductor roto, en metros.

17. Se calcula el momento por rotura de conductor, teniendo en cuenta que el conductor más alto esta a 6.4 metros con respecto a la base de la estructura.

$$M_{WR} = 216.3053 \times 6.4 = 1384.3539 \text{ [daN m]}$$

Momento por desequilibrio del 50% de tensiones, $M_{T50\%}$

El desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas es en todos los conductores de la estructura, por ende, el punto de aplicación de la fuerza se considera en la altura efectiva de los conductores.

$$M_{T50\%} = N_w \times F_{T50\%} \times Z_w$$

N_w : Número de conductores sobre la estructura.

$F_{T50\%}$: Fuerza por desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas.

Z_w : Altura efectiva de los conductores, en metros.

18. Se calcula el momento por desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas.

$$M_{T50\%} = 3 \times 112.7795 \times 6.1 = 2063.8645 \text{ [daN m]}$$

Momentos resistente de la estructura

Según la NTC 1329, el momento resistente es producido por la carga de rotura máxima a 20 centímetros de la cima de la estructura.

$$M_R = C_R \times (L - L_e - 0.2)$$

C_R : Carga de rotura de la estructura.

L : Longitud total de la estructura, en metros.

L_e : Longitud de empotramiento, en metros.

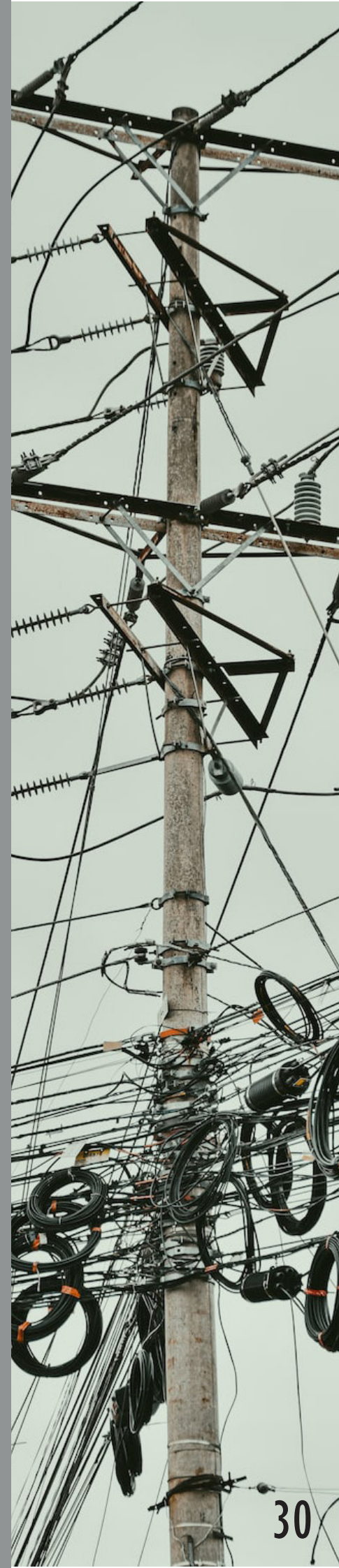
19. Teniendo una longitud de empotramiento de 1.4 metros y una longitud total de la estructura de 8 metros, se calcula el momento resistente.

$$M_R = 500.1 \times (8 - 1.4 - 0.2) = 3200.64 \text{ [daN m]}$$

Verificación de postes de concreto

La verificación de los postes de concreto se realiza mediante el método de esfuerzos admisibles, teniendo en cuenta un factor de seguridad de 2.5 definido para estructuras de concreto en el RETIE.

- » Momento actuante en condición normal.
- » Momento actuante en condición anormal.
- » Verificación final.





Momento actuante en condición normal

En condición normal el momento actuante es la suma geométrica de todos los momentos longitudinales y transversales presentes en la estructura, sin contar el momento resistente.

$$M_A = \sqrt{(M_{TW})^2 + (M_{Vs} + M_{Va} + M_{Vw} + M_{T\theta})^2}$$

M_{TW} : Momento por desequilibrio de tensiones mecánicas.

M_{Vw} , M_{Va} , M_{Vs} : Momento por presión del viento en conductores, aisladores y estructura, respectivamente.

$M_{T\theta}$: Momento por cambio de dirección de la línea.

20. Se calcula el momento actuante en condición normal.

$$M_A = \sqrt{(0)^2 + (30.3926 + 21.5738 + 0.6313 + 791.6452)^2} = 844.2429 \text{ [daN m]}$$



Momentos actuante en condición anormal

En las condiciones anormales de conductor roto y desbalance del 50% de tensiones mecánicas, el momento actuante es únicamente el momento estudiado en la hipótesis.

$$M_{A1} = M_{WR}$$

$$M_{A2} = M_{T50\%}$$

M_{WR} : Momento por conductor roto.

$M_{T50\%}$: Momento por desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas.

21. Se tienen los momentos actuantes en las hipótesis anormales.

$$M_{A1} = 1384.3539 \text{ [daN m]}$$

$$M_{A2} = 2063.8645 \text{ [daN m]}$$



Verificación final

Se comparan los momentos actuantes en las condiciones normal y anormales con el momento resistente de la estructura, teniendo en cuenta el factor de seguridad de 2.5 para postes de concreto.

$$\frac{M_R}{M_A} > 2.5$$

M_R : Momento resistente.
 M_A : Momento actuante.

22. Se comprueba si el momento resistente es suficiente para soportar los momentos actuantes en todas las condiciones de diseño.

$$\begin{array}{l} \frac{3200.64}{844.2429} = 3.7911 \quad 3.7911 > 2.5 \\ \frac{3200.64}{1384.353} = 2.312 \quad 2.312 < 2.5 \\ \frac{3200.64}{2063.864} = 1.551 \quad 1.551 < 2.5 \end{array}$$

23. En este caso se cumple la desigualdad en condición normal, sin embargo, no se cumple en las condiciones anormales, por ende, hay que cambiar las características del poste (carga de rotura, diámetros de base y cima) y comprobar nuevamente hasta cumplir con la desigualdad en todas las condiciones de diseño.

Se comprueba con las siguientes características disponibles en la tabla

$$\text{Altura} = 8 \text{ [m]}$$

$$\text{Carga de rotura} = 735.5 \text{ [daN]}$$

$$\text{Diámetro cima} = 14 \text{ [cm]}$$

$$\text{Diámetro base} = 26 \text{ [cm]}$$

$$M_R = 735.5 \times (8 - 1.4 - 0.2) = 4707.2 \text{ [daN m]}$$

$$\frac{4707.2}{1384.353} = 3.401 \quad 3.401 > 2.5$$

$$\frac{4707.2}{2063.864} = 2.281 \quad 2.281 < 2.5$$

Con estos valores no se cumple la condición de desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas, se comprueba con las siguientes características disponibles en la tabla.

$$\text{Altura} = 8 \text{ [m]}$$

$$\text{Carga de rotura} = 1029.7 \text{ [daN]}$$

$$\text{Diámetro cima} = 19 \text{ [cm]}$$

$$\text{Diámetro base} = 31 \text{ [cm]}$$

$$M_R = 1029.7 \times (8 - 1.4 - 0.2) = 6590.1 \text{ [daN m]}$$

$$\frac{6590.1}{1384.353} = 4.761 \quad 4.761 > 2.5$$

$$\frac{6590.1}{2063.864} = 3.193 \quad 3.193 > 2.5$$

Se recalculan los valores de fuerza por presión del viento sobre la estructura y momento actuante en condición normal.

$$F_{Vs} = 12.8865 \text{ [daN]}$$

$$M_{Vs} = 39.1234 \text{ [daN m]}$$

$$M_A = 852.9737 \text{ [daN m]}$$

$$\frac{6590.1}{852.9737} = 7.726 \quad 7.726 > 2.5$$

Al realizar los cálculos con las últimas características presentadas, se cumple con la verificación requerida, por esta razón es la estructura seleccionada para el caso presentado en el ejercicio ejemplo.

RESUMEN DE LOS CÁLCULOS

- Se realiza una primera selección de la estructura teniendo en cuenta las características mínimas para el nivel de tensión de la línea.
- Se realizan los cálculos de fuerzas en condición normal y anormal en la estructura.
- Se realizan los cálculos de momentos actuantes en condición normal y anormal en la estructura.
- Se realiza el cálculo del momento resistente de la estructura.
- Se verifica que el coeficiente resultado del momento resistente sobre el momento actuante sea mayor que el factor de seguridad de 2.5 para estructuras de concreto, en todas las condiciones normales y anormales.
- En caso de que no se cumpla con el valor de 2.5 se deben ajustar las características de la estructura.
- Cuando se tengan las características de la estructura con las cuales se cumplan las verificaciones, se seleccionan para la estructura de la línea.

Observaciones

- Cuando las características de la estructura se deben cambiar debido a que no se cumple con alguna de las verificaciones, se deben recalcular las fuerzas y momentos.
- Si la estructura se diseña con más de una línea, en la hipótesis normal se deben tener en cuenta las fuerzas ejercidas por todos los aisladores y conductores. Para las hipótesis anormales (conductor roto y desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas) se deben analizar los momentos actuantes para cada línea por separado.
- No es recomendable tener más de dos líneas por estructura.
- Para los lectores que estén más familiarizadas con la unidad [kgf], la conversión de [daN] es:
$$1 \text{ kgf} = 0.981 \text{ daN}$$

Bibliografía

- » American Society of Civil Engineers - Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (ASCE No. 74) - 2020.
- » Electrificadora de Santander - Redes áreas de media tensión (NTR-01) - 2022.
- » Grupo EPM - Especificación técnica para postes de concreto (ET-TD-ME04-01) - 2019.
- » Grupo EPM - Guía Técnica: Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos (GM-12) - 2019.
- » ICONTEC Internacional - Prefabricados en concreto. Postes de concreto para líneas de energía eléctrica y telecomunicaciones (NTC 1329) - 2013.
- » Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR 10) - 2010.
- » Ministerio de Minas y Energía - Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) - 2013.

