



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS  
MODIFICACIONES A LAS NORMAS  
TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS  
PARA DISEÑO POR VIENTO 2004 Y  
2017**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A (N)**

Omar Antonio Villegas Valencia

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Adrián Pozos Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se presentan los cambios principales en la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento (NTCDV) 2017 con respecto a la del 2004. Estos cambios incluyen redacción, figuras y especificaciones. Se realiza también una evaluación de las metodologías de análisis (método estático y método dinámico) empleando como herramienta de cálculo Matlab.

Se utilizó una base de datos de 10 edificios para determinar los factores involucrados en la determinación de la respuesta dinámica de los edificios sometidos a la acción del viento. Cada uno de los edificios fue seleccionado de tal manera que, dadas sus características, requiriera el uso del método dinámico de las NTCDV 2004 y 2017. Para efectos de comparación, también se utilizó el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento 2008 (MDOCDV, 2008).

El análisis se efectuó considerando una misma zona de desplante correspondiente a un terreno con gran densidad de edificios altos y con una topografía uniforme donde no existen cambios topográficos importantes. De esta manera, los resultados se compararon bajo las mismas condiciones. De los 10 edificios analizados, se seleccionó el edificio con el mayor valor del factor de amplificación dinámica (FAD) de acuerdo con la NTCDV 2017, mismo que fue modelado digitalmente en el programa SAP2000 con el propósito de determinar los desplazamientos asociados a las fuerzas dinámicas equivalentes.

## **ABSTRACT**

In this research work, the main changes in the complementary technical standard for wind design 2017 (NTCDV in Spanish) with respect to the 2004 edition are presented. These changes include redaction, figures, and specifications. An evaluation of the methodologies of analysis (static method and dynamic method) by using Matlab as calculation tool is presented.

A database of 10 buildings was used to determine the factors involved in the determination of the dynamic response of the buildings due to the wind action. Each of the buildings was selected in such a way that, given its characteristics, they require the use of the dynamic method of the complementary technical standards for wind design 2004 and 2017. For comparison purposes, the design manual of civil works for wind design 2008 (MDOCDV in Spanish) was also used.

The analysis was made considering, for each building, the same geographic zone which corresponds to a terrain with high density of tall buildings and a uniform topography where there are no major topographic changes. In this way, the results were compared under the same conditions. From the ten buildings from the database, the building with the highest value of the dynamic amplification factor (FAD) of the NTCDV 2017 was selected, which was digitally modelled in the program SAP2000 with the purpose of determining the displacements associated with the equivalent dynamic forces.

## AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Bibiana, que me brindó todo su amor, cariño, soporte, fortaleza, educación y lucidez para desarrollarme como persona. Por todas aquellas cosas que ha hecho incondicionalmente desde que me brindó la dicha de mi existencia. Por darme el ejemplo que luchando con fuerza de voluntad se alcanzan las metas y se consigue lo que se desea. Por eso y más... gracias.

A mi papá José, que me brindo apoyo económico durante toda la licenciatura.

Un agradecimiento especial al Dr. Adrián Pozos Estrada, que gracias a su experiencia, sabiduría, apoyo y orientación fue posible la realización de este trabajo. Por ser una excelente persona y un ejemplo a seguir. Por inspirar con su trabajo a todas las personas que tienen el gusto de conocerlo. Por su amistad y por todos sus consejos.

A Daniela Itzel García García, que se convirtió en alguien muy importante en mi vida. Por haberme acompañado durante varios años y haberme brindado su amor, respeto, cariño, amistad, paciencia, apoyo y, sobre todo... su tiempo, concepto intangible que lo convierte en un regalo eterno, sin fin.

Al Dr. Edgardo Ulises Benítez Eslava, por sus consejos y apoyo brindado en la culminación de este trabajo. Por su amistad y disposición para ayudar en cualquier momento. Por preocuparse en formar ingenieros dignos de la Facultad de Ingeniería.

A todos mis amigos que formaron parte de esta etapa aportando concomimientos, anécdotas y momentos únicos que prevalecerán en mi memoria.

A mis sinodales, que con sus conocimientos y experiencia realizaron comentarios que permitieron que este trabajo se enriqueciera.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme otorgado un lugar dentro de sus instalaciones y formar parte de la mejor comunidad universitaria.

A la Facultad de Ingeniería, por otorgarme los conocimientos y habilidades necesarias para desarrollarme como profesionista.

Investigación realizada gracias al Programa UNAM – PAPIIT **I101318**.

Al Grupo de Ingeniería de Viento del IIUNAM.

*Be here now...*

## ÍNDICE

Resumen .....	2
Abstract .....	3
Agradecimientos .....	4
Notación .....	7
Índice de figuras .....	10
Índice de tablas .....	12
Objetivos .....	14
Hipótesis .....	14
Justificación .....	14
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>16</b>
1.1. Sistemas de un grado de libertad.....	18
1.1.1. Fuerza de amortiguamiento.....	21
1.1.2. Respuestas estáticas y dinámicas.....	22
1.2. Viento .....	23
1.2.1. Consideraciones de diseño .....	24
1.2.2. Tipos de viento .....	25
1.3 Características del viento .....	26
1.3.1. Variación de la velocidad del viento con la altura .....	26
1.3.2. Turbulencia del viento.....	27
1.3.3. Aproximación probabilística.....	28
1.3.4. Vórtices, número de Strouhal y el efecto de resonancia .....	29
1.3.5. Naturaleza dinámica del viento.....	31
1.3.6. Presiones debidas al viento.....	32
<b>Capítulo 2 NORMATIVIDAD .....</b>	<b>35</b>
2.1 Historia de la normatividad en la Ciudad de México .....	35
2.2 Normativa internacional de viento .....	36
2.2.1 National Building Code of Canada (NBCC 2015): Wind Load Provisions .....	37
2.2.1.1 Método Estático .....	38
2.2.1.2 Método Dinámico.....	42
2.2.1.3 Pruebas en Túnel de Viento .....	45

2.2.2	Eurocode 1: Actions on Structures – Wind Actions .....	46
2.3	Normativa de viento en la Ciudad de México .....	54
2.3.1	Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento 2004 (NTCDV).....	55
2.3.2	Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento 2008 (MDOCDV).....	65
<b>Capítulo 3 COMPARACIÓN DE LAS NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR VIENTO .....</b>		<b>96</b>
3.1	Principales cambios de la NTCDV (2017) con respecto a la NTCDV (2004).....	96
3.2	Comparación de los factores para el cálculo de la respuesta dinámica de la NTCDV (2017) con respecto a la NTCDV (2004) .....	104
<b>Capítulo 4 EJEMPLO DE UN EDIFICIO SOMETIDO A LAS PRESIONES CALCULADAS CON LA NTCDV (2017) CON RESPECTO A LA NTCDV (2004).....</b>		<b>130</b>
4.1	Análisis y comparación de resultados .....	140
<b>Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>148</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>150</b>
<b>REFERENCIAS ELECTRÓNICAS .....</b>		<b>152</b>
<b>ANEXO .....</b>		<b>153</b>

## NOTACIÓN

$A_{exp}$	área expuesta perpendicular a la dirección del viento, en $m^2$	$F_{AD}$	factor de amplificación dinámica, adimensional
$A_{ref}$	área de referencia sobre la que actúa la presión, en $m^2$	$F_D$	fuerza de amortiguamiento de un sistema, en N
$A_z$	área de la estructura o parte de ella, en $m^2$	$F_E$	fuerza elástica de un sistema, en N
$a$	vector que representa la posición inicial de una partícula en un plano	$F_{eq}$	fuerza dinámica equivalente, en kg
$B$	factor de excitación de fondo, adimensional	$F_{es}$	fuerza estática del viento perpendicular a la superficie, en kg
$B^2$	factor de respuesta de fondo, adimensional	$F_I$	fuerza inercial de un sistema
$b$	ancho de la estructura, en m	$F_L$	fuerza por unidad de longitud, en kg/m
$\bar{b}$	parámetro del factor de exposición para efectos dinámicos, adimensional	$F_{rz}$	factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional
$C_{dir}$	factor direccional, adimensional	$F'_{rz}$	factor de exposición para efectos dinámicos, adimensional
$C_e$	factor correctivo por exposición, adimensional	$F_T$	factor que depende de la topografía local, adimensional
$C_{eH}$	factor de exposición evaluado a una altura de referencia $H$ , adimensional	$F_{TF}$	factor transformante, adimensional
$C_g$	factor de efectos de ráfaga, adimensional	$F_{TR}$	factor correctivo por exposición, adimensional
$C_I$	costo inicial de la construcción	$F_V$	fuerza cortante en el entrepiso o segmento en estudio, en kg
$C_L$	costo de las pérdidas directas e indirectas	$F_\alpha$	factor de variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional
$C_p$	coeficiente local de presión, adimensional	$f$	frecuencia de desprendimiento de vórtices, en Hz
$C_{pe}$	coeficiente de presión exterior, adimensional	$f_n$	frecuencia natural más baja de la estructura, en Hz
$C_{pi}$	coeficiente de presión interna, adimensional	$f_L(z, n)$	frecuencia reducida en función de la longitud de escala de turbulencia $L(z)$
$C_{season}$	factor de temporada, adimensional	$G$	factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional
$C_t$	factor de topografía, adimensional	$g, g_p$	factor pico de respuesta máxima, adimensional
$C_T$	factor de empuje transversal, adimensional	$H_v$	proyección horizontal de un vector en un plano
$c$	coeficiente de escala de rugosidad, adimensional	$H, h$	altura total de la estructura, en m
$c_a$	coeficiente de amortiguamiento de un sistema, adimensional	$H_h$	altura de la colina o talud, m
$c_o(z)$	factor de topografía, adimensional	$h_{ref}$	altura de referencia, en m
$c_r(z)$	factor de rugosidad, adimensional	$h_i$	altura de entrepiso, en m
$D$	diámetro de una estructura cilíndrica, en m	$\bar{h}$	altura media de la estructura a partir del nivel del suelo, en m
$d$	dimensión de la estructura paralela a la dirección del viento, en m		
$E$	porcentaje de error entre un valor esperado con un valor calculado		
$F$	relación de energía de ráfaga		

$I_v(z)$	intensidad de turbulencia a una altura $z$ , adimensional	$R_e$	número de Reynolds, adimensional
$I_W$	factor de importancia para cargas de viento, adimensional	$R_h$ y $R_b$	funciones de admitancia aerodinámica, adimensionales
$K$	factor correctivo por exposición, adimensional	$S$	factor reductivo de tamaño, adimensional
$K_A$	factor de reducción de presión por tamaño de área, adimensional	$S_t$	número de Strouhal, adimensional
$K_L$	factor de presión local, adimensional	$S_L(z, n)$	función de densidad de potencia espectral, adimensional
$k$	rigidez de un sistema, en N/m	$T, t$	tiempo, en segundos
$k_l$	factor de turbulencia, adimensional	$V$	velocidad media del viento, en m/s
$k_p$	factor pico de respuesta máxima, adimensional	$\bar{V}$	velocidad de referencia del viento a una altura de 10 m, en m/s
$k_r$	factor del terreno, adimensional	$V_b$	velocidad básica del viento a una altura de 10 m sobre el nivel de un terreno Categoría 2
$L(z_s)$	longitud de escala de turbulencia, en m	$V_{b,0}$	valor fundamental de la velocidad básica del viento
$L_h$	distancia horizontal medido desde la cima de la colina hasta el punto donde la superficie del suelo corresponde a la mitad de la altura de la colina o talud, en m	$V_{cr}$	velocidad crítica del viento
$ML$	muro lateral de la estructura	$V_D$	velocidad básica de diseño a una altura $z$
$m$	masa de un sistema, en kg	$V'_D$	velocidad media evaluada a la altura $z_s$ para efectos dinámicos
$n_0$	frecuencia del modo fundamental de la estructura, en Hz	$V_g$	velocidad gradiente, en km/h
$n_{1,x}$	frecuencia natural de vibración de la estructura en la dirección del viento, en Hz	$V_H$	velocidad media del viento para efectos dinámicos, en m/s
$P$	probabilidad de un evento de ser excedido durante un periodo de tiempo	$V_m(z)$	velocidad media del viento, en km/h
$P_a$	probabilidad anual de un evento de ser excedido	$V_R$	velocidad regional de ráfaga correspondiente al sitio de desplante
$p$	presión normal a la superficie de la estructura, en Pa	$V_{tn}$	velocidad correspondiente a un lapso de promediación de $n$ segundos, en km/h
$p(t)$	carga aplicada a un sistema en dirección del desplazamiento	$V_v$	proyección vertical de un vector en un plano
$p_z$	presión de diseño, en Pa	$V_{zn}$	velocidad del viento a una altura $z$ para cualquier categoría del terreno, en km/h
$p_e$	presión exterior, en Pa	$V_{10}$	velocidad regional de ráfaga a una altura base de 10 metros para una Categoría 2 del terreno, en km/h
$p_i$	presión interior, en Pa	$W$	suma de las cargas viva y muerta por encima de un entresuelo o segmento, en kg
$Q$	factor de importancia de pérdidas, adimensional	$w$	ancho mínimo efectivo de la estructura, en m
$q$	presión de la velocidad de referencia, en Pa	$w_e$	presión externa sobre la estructura, en Pa
$q_z$	presión dinámica de base, en Pa	$w_i$	presión interna en las superficies internas de la estructura, en Pa
$q_p(z)$	presión pico de la velocidad, en Pa	$X_0$	posición inicial de la partícula en un instante de tiempo
$R$	factor de rugosidad, adimensional	$x$	distancia horizontal medida desde la cima de la colina o talud
$R^2$	factor de respuesta en resonancia, adimensional		



$x_p$	desplazamiento de una partícula	$\omega$	velocidad angular de un vector que rota, en rad/s
$x_0$	frecuencia reducida, en Hz	$\rho$	densidad del aire, en kg/m <sup>3</sup>
$\dot{x}$	primera derivada del desplazamiento, representa la velocidad de una partícula con respecto al tiempo	$\zeta_{1,x}$	relación de amortiguamiento total, adimensional
$\ddot{x}$	segunda derivada del desplazamiento, representa la aceleración de una partícula con respecto al tiempo	$\tau$	temperatura ambiental, en °C
$z$	altura por encima de la superficie del suelo, en m	$\psi$	cociente del desplazamiento relativo entre dos niveles de piso, dividido entre la diferencia de elevaciones, adimensional
$z_g$	altura nominal de la capa límite atmosférica, en m	$\Omega$	presión barométrica, en mm de Hg
$z_{max}$	longitud máxima de la rugosidad, en m		
$z_{min}$	longitud mínima de la rugosidad, en m		
$z_n$	altura por encima de la superficie del suelo para una categoría del terreno $n$ , en m		
$z_s$	altura de referencia, en m		
$z_0$	longitud de la rugosidad, en m		
$\alpha$	coeficiente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional		
$\alpha'$	coeficiente que determina la forma de la variación de la velocidad con la altura para efectos dinámicos, adimensional		
$\alpha_n$	coeficiente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura para una categoría del terreno $n$ , adimensional		
$\beta$	fracción de amortiguamiento crítico, adimensional		
$\delta$	altura gradiente, en m		
$\delta_a$	decremento logarítmico total del amortiguamiento		
$\delta_n$	altura gradiente para cualquier categoría del terreno $n$ , en m		
$\Delta S$	aceleración del viento en la cima de una colina o talud		
$\Delta S_{max}$	aceleración máxima del viento en la cima de una colina o talud		
$\eta_h, \eta_b$	frecuencias reducidas, en Hz		
$\theta$	ángulo de inclinación del techo de la estructura, en grados		
$v$	tasa media de fluctuación o frecuencia de cruces por cero, en Hz		

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (IZQ). SISTEMA OSCILANDO (DER). (CHOPRA K., 2014) .....	18
FIGURA 2 GRADOS DE LIBERTAD DE UN MARCO RÍGIDO (CHOPRA K., 2014) .....	19
FIGURA 3 REPRESENTACIÓN DE UN VECTOR QUE ROTA.....	19
FIGURA 4 VIGA CON CARGA ESTÁTICA (IZQ.). VIGA CON CARGA DINÁMICA (DER) (CLOUGH W & PENZIEN, 1995)....	23
FIGURA 5 DAÑOS EN VENTANAS POR LA ACCIÓN DEL VIENTO (PULMIG, 2018) .....	25
FIGURA 6 PERFIL DE VELOCIDADES ASOCIADO A DISTINTAS RUGOSIDADES DEL TERRENO.....	27
FIGURA 7 REPRESENTACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FLUCTUANTE DEL VIENTO CON LA ALTURA (BUNGALE S., 2005) .....	28
FIGURA 8 REPRESENTACIÓN BIDIMENSIONAL DEL VIENTO ACTUANDO EN LAS ESTRUCTURAS (BUNGALE S., 2005) .	29
FIGURA 9 PROCESO DE GENERACIÓN DE VÓRTICES DE VON KARMAN SOBRE UN ELEMENTO (BUNGALE S., 2005)..	30
FIGURA 10 DAÑOS EN BORDES DE ESTRUCTURAS LIGERAS (AVELAR FRAUSTO, 2017).....	32
FIGURA 11 PUENTE TACOMA EN RESONANCIA (VELASCO J., 2018).....	34
FIGURA 12 ACCELERACIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN UNA COLINA (SUPERIOR) Y UN TALUD (INFERIOR) (NBCC, 2015) NOTA FIGURA 12: $V(z)$ VELOCIDAD DEL VIENTO A UNA ALTURA $Z$ .....	41
FIGURA 13 CURVAS PARA OBTENER EL FACTOR DE TURBULENCIA DE FONDO, $B$ , DE MANERA GRÁFICA (NBCC, 2015) .....	45
FIGURA 14 DIAGRAMAS DE PRESIÓN IDENTIFICANDO SU SIGNO, NEG (-) Y POS (+) (EUROCODE 1, 2005) .....	51
FIGURA 15 FORMAS GENERALES DE ESTRUCTURAS. LAS DIMENSIONES Y ALTURA DE REFERENCIA TAMBIEN SON MOSTRADAS. A) ESTRUCTURAS VERTICALES, B) ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y C) ANUNCIOS (EUROCODE 1, 2005) .....	52
FIGURA 16 RUGOSIDAD DEL TERRENO (NTCDV , 2004).....	57
FIGURA 17 FORMAS TOPOGRÁFICAS LOCALES (NTCDV , 2004) .....	59
FIGURA 18 PARÁMETRO $B$ PARA CALCULAR EL FACTOR DE RESPUESTA DINÁMICA (NTCDV , 2004).....	62
FIGURA 19 PARÁMETRO $S$ PARA CALCULAR EL FACTOR DE RESPUESTA DINÁMICA (NTCDV , 2004).....	63
FIGURA 20 PARÁMETRO $F$ PARA CALCULAR EL FACTOR DE RESPUESTA DINÁMICA (NTCDV , 2004) .....	63
FIGURA 21 APARICIÓN DE VÓRTICES ALTERNANTES (MDOCDV, 2008) .....	69
FIGURA 22 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE DISEÑO POR VIENTO (MDOCDV, 2008) NOTA: LOS NÚMEROS DENTRO DE LOS PARÉNTESIS, FIGURAS Y APÉNDICES MOSTRADOS CORRESPONDEN A LOS DEL MDOCDV 2008, MAS NO A LOS DE ESTE TRABAJO .....	70
FIGURA 23 LAPSO DE PROMEDIACIÓN Y PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (MDOCDV, 2008).....	73
FIGURA 24 FACTOR DE RÁFAGA $g(t/3600 s)$ PARA UNA CATEGORÍA 2 DE TERRENO Y A UNA ALTURA DE 10 M SOBRE EL NIVEL DEL TERRENO NATURAL (MDOCDV, 2008).....	74
FIGURA 25 MAPA DE ISOTACAS ASOCIADO A DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO. 200 AÑOS (SUP-IZQ), 50 AÑOS (SUP-DER) Y 10 AÑOS (INF-CENTRO) (MDOCDV, 2008).....	75
FIGURA 26 MAPA DE ISOTACAS ASOCIADO A UN FACTOR DE DISEÑO ÓPTIMO. $Q=15$ (IZQ) Y $Q=5$ (DER) (MDOCDV, 2008) .....	76
FIGURA 27 CONVENCION DE SIGNOS PARA LAS PRESIONES EJERCIDAS POR EL VIENTO EN UNA EDIFICACION CON ABERTURAS EN BARLOVENTO O SOTAVENTO (MDOCDV, 2008).....	82
FIGURA 28 ZONAS PARA LA DETERMINACION DE LOS FACTORES DE PRESION, $KL$ , PARA RECUBRIMIENTOS Y SUS SOPORTES (MDOCDV, 2008) .....	86
FIGURA 29 EJEMPLOS QUE MUESTRAN DIFERENTES CASOS DE ABERTURAS EN MUROS DE EDIFICACIONES (MDOCDV, 2008).....	88

FIGURA 30 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO (MDOCDV, 2008) NOTA: LOS NÚMEROS DENTRO DE LOS PARÉNTESIS, FIGURAS Y APÉNDICES MOSTRADOS CORRESPONDEN A LOS DEL MDOCDV 2008, MAS NO A LOS DE ESTE TRABAJO.....	89
FIGURA 31 FORMAS GENERALES DE ESTRUCTURAS. A) ESTRUCTURAS VERTICALES, B) ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y C) ANUNCIOS .....	92
FIGURA 32 VISTA GENERAL DE LA ESTRUCTURA DEL TEXTO DE LA NTCDV 2004 (IZQ) Y DE LA NTCDV 2017 (DER) .....	97
FIGURA 33 NUMERACIÓN DE LOS SUBCAPÍTULOS CORREGIDA. NTCDV 2004 (IZQ) Y NTCDV 2017 (DER).....	97
FIGURA 34 COMPARACIÓN DE DOS TABLAS IDÉNTICAS. NUMERACIÓN ORIGINAL NTCDV 2004 (IZQ) Y NUMERACIÓN CORREGIDA NTCDV 2017 (DER).....	98
FIGURA 35 COMPARACIÓN DE LOS ÍNDICES DE LAS NTCDV. NTCDV 2004 (IZQ) Y NTCDV 2017 (DER).....	98
FIGURA 36 TABLA Y FIGURA DE APOYO PARA DETERMINAR EL VALOR DEL COEFICIENTE DE PRESIÓN PARA CUBIERTAS EN ARCO (NTCDV , 2004) .....	100
FIGURA 37 CORRECCIÓN DEL DIAGRAMA DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE ELEMENTOS DE RECUBRIMIENTO. NTCDV 2004 (IZQ) Y NTCDV 2017 (DER) .....	101
FIGURA 38 ERRORES Y OMISIONES PRESENTES EN LA TABLA 5.0.1 DE LA (NTCDV, 2017).....	102
FIGURA 39 ERRORES Y OMISIONES PRESENTES EN LA TABLA 5.2.1 DE LA (NTCDV, 2017).....	102
FIGURA 40 OMISIÓN DE DOS EXPRESIONES PARA DETERMINAR LAS FRECUENCIAS REDUCIDAS $\eta_h$ Y $\eta_b$ (NTCDV, 2017) .....	103
FIGURA 41 ALTURA DE EDIFICIOS.....	105
FIGURA 42 ISOMÉTRICO DE LA BASE DE DATOS DE EDIFICIOS .....	105
FIGURA 43 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE VARIACIÓN CON LA ALTURA, $F\alpha$ (MÉTODO ESTÁTICO) .....	114
FIGURA 44 COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO, $VD$ (MÉTODO ESTÁTICO) .....	115
FIGURA 45 COMPARACIÓN DE LA PRESIÓN DE DISEÑO, $p_z$ (MÉTODO ESTÁTICO) .....	115
FIGURA 46 COMPARACIÓN DEL AJUSTE DE LAS PRESIONES DE DISEÑO DE LA NTCDV 2017 CON BASE EN EL LAPSO DE PROMEDIACIÓN, $p_z * FTF$ . (NOTA: LAS PRESIONES DE LA NTCDV 2004 NO FUERON AJUSTADAS)..	116
FIGURA 47 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE VARIACIÓN CON LA ALTURA, $F \alpha'$ (MÉTODO DINÁMICO) .....	117
FIGURA 48 COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA PARA EFECTOS DINÁMICOS, $V D'$ (MÉTODO DINÁMICO).....	118
FIGURA 49 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE RESPUESTA MÁXIMA, $g$ (MÉTODO DINÁMICO).....	119
FIGURA 50 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE RESPUESTA EN RESONANCIA, $R$ (MÉTODO DINÁMICO).....	120
FIGURA 51 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE RESPUESTA DE FONDO, $B$ (MÉTODO DINÁMICO) .....	122
FIGURA 52 COMPARACIÓN DE LA TASA MEDIA DE FLUCTUACIÓN, $\nu$ (MÉTODO DINÁMICO) .....	124
FIGURA 53 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA, $FAD$ , CONTEMPLANDO EL FACTOR TRANSFORMANTE, $FTF$ .....	125
FIGURA 54 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA, $FAD$ , SIN CONTEMPLAR EL FACTOR TRANSFORMANTE, $FTF$ .....	126
FIGURA 55 COMPARACIÓN DE LA PRESIÓN DE DISEÑO AMPLIFICADA, $p_z * FAD$ .....	127
FIGURA 56 COMPARACIÓN ENTRE LA PRESIÓN DE DISEÑO ESTÁTICA Y LA PRESIÓN DE DISEÑO AMPLIFICADA EMPLEANDO LA NORMATIVIDAD DE VIENTO.....	127
FIGURA 57 CARACTERÍSTICAS SELECCIONADAS DEL ENTORNO DE DESPLANTE DE LOS EDIFICIOS (NTCDV, 2017) .....	131
FIGURA 58 ISOMÉTRICO DEL MODELO DIGITAL EN SAP2000 CON LA INCIDENCIA DEL VIENTO INDICADA .....	138
FIGURA 59 DISTINTAS VISTAS DEL MODELO DIGITAL EN SAP2000 DEL EDIFICIO 3 .....	139
FIGURA 60 GRÁFICAS COMPARATIVAS DE LOS DESPLAZAMIENTO (IZQ) Y DE DISTORSIONES DE ENTREPISO (DER) NTCDV 2004 .....	146

FIGURA 61 GRÁFICAS COMPARATIVAS DE LOS DESPLAZAMIENTO (IZQ) Y DE DISTORSIONES DE ENTREPISO (DER) NTCDV 2017 .....	147
FIGURA 62 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DE DISEÑO, $p_z$ ASOCIADO A UNA CONFIGURACIÓN DEL TERRENO ESTABLECIDA.....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 VALORES DEL FACTOR DE IMPORTANCIA (NBCC, 2015) .....	39
TABLA 2 VALORES DE $\Delta S_{max}$ Y $\alpha$ (NBCC, 2015) .....	41
TABLA 3 VALORES DE $z_0$ Y $z_{min}$ (EUROCODE 1, 2005) .....	48
TABLA 4 EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS Y SUS CORRESPONDIENTES EFECTOS DEL VIENTO A CONSIDERAR .....	56
TABLA 5 VELOCIDADES REGIONALES SEGÚN LA IMPORTANCIA DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA ZONIFICACIÓN (NTCDV , 2004) .....	57
TABLA 6 RUGOSIDAD DEL TERRENO, $\alpha$ Y $\delta$ (NTCDV , 2004) .....	58
TABLA 7 FACTOR DE TOPOGRAFÍA Y RUGOSIDAD DEL TERRENO (NTCDV , 2004).....	58
TABLA 8 VALORES DE COEFICIENTES DE PRESIÓN PARA ESTRUCTURAS CERRADAS.....	60
TABLA 9 PARÁMETROS R, A Y N SEGÚN LA CONDICIÓN DE EXPOSICIÓN (NTCDV , 2004) .....	64
TABLA 10 EJEMPLOS DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN SU IMPORTANCIA .....	67
TABLA 11 EJEMPLOS DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN SU RESPUESTA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO.....	69
TABLA 12 EJEMPLOS DE CATEGORÍA DEL TERRENO.....	72
TABLA 13 VALORES DE $\alpha$ , $\delta$ Y C (MDOCDV, 2008).....	77
TABLA 14 FACTOR DE TOPOGRAFÍA LOCAL, $FT$ (MDOCDV, 2008).....	78
TABLA 15 RELACIÓN ENTRE LA ALTITUD Y LA PRESIÓN BAROMÉTRICA (MDOCDV, 2008) .....	79
TABLA 16 COEFICIENTES DE PRESIÓN EXTERIOR, $C_{pe}$ , PARA MUROS EN BARLOVENTO Y SOTAVENTO DE CONSTRUCCIONES CERRADAS (MDOCDV, 2008).....	83
TABLA 17 COEFICIENTE DE PRESIÓN EXTERIOR, $C_{pe}$ , PARA ZONAS DE MUROS LATERALES DE CONSTRUCCIONES CERRADAS (MDOCDV, 2008) .....	84
TABLA 18 FACTOR DE REDUCCIÓN, $KA$ , PARA TECHOS Y MUROS LATERALES (MDOCDV, 2008).....	84
TABLA 19 FACTOR DE PRESIÓN LOCAL, $KL$ , PARA RECUBRIMIENTOS Y SUS SOPORTES (MDOCDV, 2008).....	85
TABLA 20 COEFICIENTE DE PRESIÓN INTERIOR, $C_{pi}$ , PARA CONSTRUCCIONES CON PLANTA RECTANGULAR CERRADA Y MUROS PERMEABLES .....	87
TABLA 21 COEFICIENTE DE PRESIÓN INTERIOR, $C_{pi}$ , PARA CONSTRUCCIONES CON PLANTA RECTANGULAR CERRADA Y MUROS Y TECHOS CON ABERTURAS DOMINANTES (MDOCDV, 2008) .....	87
TABLA 22 VALORES DE $b$ Y $\alpha'$ (MDOCDV, 2008).....	90
TABLA 23 VALORES REPRESENTATIVOS DE LA RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL (MDOCDV, 2008) .....	94
TABLA 24 VALORES DE LAS CONSTANTES $d$ , $z_0$ , $z_{min}$ Y $\alpha$ (MDOCDV, 2008) .....	94
TABLA 25 REQUISITOS DE EJECUCIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN SU RESPUESTA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO ...	99
TABLA 26 CAMBIOS EN LOS COEFICIENTES DE PRESIÓN PARA CUBIERTAS EN ARCOS (NTCDV, 2017).....	100
TABLA 27 BASE DE DATOS DE EDIFICIOS.....	104
TABLA 28 CARACTERÍSTICAS DE ENTORNO DE DESPLANTE DE LOS EDIFICIOS .....	106
TABLA 29 RESULTADOS DE $F\alpha$ , $VD$ Y $p_z$ CON CADA NORMATIVA DE VIENTO.....	112
TABLA 30 RESULTADOS DE $p_z$ ajustada, $F$ , $\alpha'$ Y $VD'$ CON CADA NORMATIVA DE VIENTO.....	113

TABLA 31 RESULTADOS DE $g$ , $v$ Y $R$ CON CADA NORMATIVA DE VIENTO .....	113
TABLA 32 RESULTADOS DE $B$ , $FAD$ Y $p_z * FAD$ CON CADA NORMATIVA DE VIENTO .....	113
TABLA 33 VALORES DE $R$ , $VH$ Y $F$ (NTCDV, 2004) .....	121
TABLA 34 VALORES DE $R$ Y $n_0$ (NTCDV, 2017) .....	121
TABLA 35 VALORES DE $B$ Y $(b + h)$ (NTCDV, 2004) .....	122
TABLA 36 VALORES DE $B$ , $Lzs$ Y $(b + h)/Lzs$ (NTCDV, 2017) .....	123
TABLA 37 PORCENTAJE DE INCREMENTO DE LAS PRESIONES AMPLIFICADAS CON RESPECTO A LAS PRESIONES DE DISEÑO ESTÁTICAS .....	128
TABLA 38 PORCENTAJE DE CAMBIO ENTRE LAS PRESIONES AMPLIFICADAS DE LA NTCDV 2017 CON RESPECTO A LA NTCDV 2004 .....	129
TABLA 39 VALORES DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA (IZQ). CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO SELECCIONADO (DER) .....	131
TABLA 40 CARACTERÍSTICAS DE ENTREPISOS Y DIMENSIONES DE CLAROS CORRESPONDIENTES A UN PLANO LONGITUDINAL .....	136
TABLA 41 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	137
TABLA 42 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN .....	137
TABLA 43 VALORES DE LAS FUERZAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS APLICADAS EN LOS NODOS DEL MODELO (NTCDV, 2004) .....	139
TABLA 44 VALORES DE LAS FUERZAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS APLICADAS EN LOS NODOS DEL MODELO (NTCDV, 2017) .....	140
TABLA 45 FRECUENCIA Y PERIODOS DE VIBRACIÓN DEL MODELO .....	141
TABLA 46 DESPLAZAMIENTOS Y DISTORSIONES DE ENTREPISO PROVOCADOS POR LAS FUERZAS DEL VIENTO EN EL MODELO (NTCDV, 2004) .....	142
TABLA 47 DESPLAZAMIENTOS Y DISTORSIONES DE ENTREPISO PROVOCADOS POR LAS FUERZAS DEL VIENTO EN EL MODELO (NTCDV, 2017) .....	143
TABLA 48 COMPARACIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS RESULTANTES DE LAS NTCDV 2004 Y 2017 .....	144
TABLA 49 COMPARACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS ASOCIADOS A LAS FUERZAS DINÁMICAS DE LA NTCDV 2004 Y LA NTCDV 2017 .....	145
TABLA 50 VALORES DE $p_z$ ASOCIADOS A UNA CONFIGURACIÓN DEL TERRENO (MÉTODO ESTÁTICO) .....	153

## OBJETIVOS

- Este documento tiene como propósito identificar los principales cambios realizados en la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento (NTCDV, 2017) y su impacto en la determinación de presiones y desplazamientos debidos a la acción del viento en edificios.
- Dado que la NTCDV 2017 presenta una metodología similar a la establecida en el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento 2008 en la determinación de la respuesta dinámica de las estructuras, un objetivo adicional es verificar analíticamente la similitud de los resultados empleando el método dinámico.

## HIPÓTESIS

Las modificaciones a la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento permitirán optimizar la seguridad estructural ante los empujes del viento al incrementar el *factor de amplificación dinámica (FAD)* o también llamado *factor de efectos dinámicos de ráfaga "G" (Gust Factor)*, con lo que se espera, incrementen los valores de presión ejercida por la acción del viento y por ende la magnitud de los desplazamientos de cada estructura. Esto representará un mejoramiento en las características geométricas de los elementos estructurales de edificios, en los elementos de recubrimiento, en los marcos que soportarán las ventanas y en su comportamiento ante empujes o vibraciones extraordinarios.

## JUSTIFICACIÓN

Derivado de la publicación de las modificaciones a la Normas Técnicas Complementarias, el 15 de diciembre del año 2017 en la Ciudad de México, fue necesario realizar el análisis de dichas modificaciones para evaluar la magnitud de los cambios y el impacto que tendrán en el diseño de nuevas estructuras, y con esto, reducir la incertidumbre cuando se encuentren ante la acción del viento. Por lo tanto, este análisis se vuelve un tema de interés, mismo que inspiró este trabajo de investigación.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la normatividad de diseño por viento en México la componen la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento 2017 (NTCDV) y el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento 2008 (MDOCDV). Hasta antes de las modificaciones a las NTCDV, las metodologías de diseño de ambas normativas se basaban en dos códigos internacionales, el Código Canadiense (NBCC por sus siglas en inglés) y el Eurocódigo. Resultado de las modificaciones, ambas normativas de diseño por viento en México son prácticamente las mismas. La NTCDV 2017 representa un extracto del MDOCDV 2008, es por ello que implícitamente se busca que los factores adquieran valores similares sin una diferencia importante.

Toda la información aquí presentada está dividida en cinco capítulos. Los primeros dos refieren al marco teórico y a la normatividad de viento en México, así como algunos códigos reconocidos internacionalmente. Dicha información permitirá comprender los aspectos fundamentales del viento y las metodologías empleadas para determinar los parámetros de diseño de estructuras, más específicamente de edificios. La información referente y enfocada al cumplimiento de los objetivos de este trabajo se desglosa en los Capítulos 3 y 4, donde se detallan los cambios que presentó la NTCDV 2017 con respecto a la NTCDV 2004. Así mismo, se especifica la base de datos de edificios con características geométricas y mecánicas de cada uno de ellos al igual que el material del que están compuestos.

Finalmente, se presenta un ejemplo de diseño de uno de los edificios contenidos en la base de datos, el cual fue seleccionado considerando el criterio del edificio con el mayor factor de amplificación dinámica resultante de las expresiones de la NTCDV 2017, al cual se le aplicaron las presiones de diseño tanto del método estático como del dinámico en forma de fuerzas equivalentes calculadas con las NTCDV 2004 y 2017, con lo cual se obtuvieron los desplazamientos y distorsiones de entrepiso. Se concluye con las observaciones técnicas correspondientes y con algunas recomendaciones en cuanto a cómo se podría mejorar la normatividad de diseño por viento y la corrección de algunos detalles que se encontraron en el documento oficial de la NTCDV 2017.

## Capítulo 1 ANTECEDENTES

En el proceso general de un proyecto de Ingeniería Civil se encuentra el diseño estructural, el cual tiene como objetivo hacer que una construcción cumpla con sus funciones sin que falle o se comporte de manera inadecuada ante las cargas que se imponen sobre ella, cuidando aspectos esenciales como la habitabilidad y los relativos a su funcionamiento. En la actualidad, es tanta la cantidad de aspectos a considerar en una construcción, que se vuelve complejo el proceso mediante el cual se crea. Por lo tanto, una obra civil puede considerarse como un sistema en el cual están contenidos elementos y subsistemas que interactúan entre sí para cumplir un solo objetivo. Algunos de estos subsistemas son, por ejemplo, el estructural, instalaciones eléctricas, sanitarias, de abastecimiento de gas, el conjunto de elementos arquitectónicos, etc. Así, la interacción que existe entre cada uno de ellos debe ser considerada en el diseño. Es importante señalar que, desarrollar la solución óptima para cada uno de estos elementos o subsistemas por separado, no conduce a la solución óptima del edificio en su totalidad.

El hecho de que el arquitecto proponga un proyecto arquitectónico sin tomar en cuenta los problemas estructurales que conllevan, representa, más que una dificultad, un reto para el ingeniero estructurista, ya que no solo debe adaptarse lo mejor posible a los requisitos arquitectónicos, sino que debe tener un conocimiento básico de los requisitos de las múltiples instalaciones del proyecto. Esto, de cierto modo, representa un aprendizaje debido a la complejidad de los nuevos diseños arquitectónicos. Por lo tanto, el proyecto general definitivo se concluye después de que los diversos especialistas hacen correcciones o ajustes en sus respectivos proyectos.

Es importante que exista una comunicación clara y concisa entre los especialistas de un proyecto, por ejemplo, entre el estructurista y el constructor, debido a que cada uno se especializa en su área y con muy poca frecuencia un constructor conoce el área de estructuras o viceversa, por lo tanto, una falta de comunicación, falta de claridad en planos estructurales, etc., puede provocar que el proyecto no se realice de manera segura y adecuada.

En algunos casos, es común la subdivisión del proceso del diseño estructural para llegar a la configuración adecuada de la estructura. En términos generales, se consideran tres aspectos fundamentales: la estructuración, el análisis y el dimensionamiento.

- *Estructuración.* El criterio, la experiencia y la creatividad desempeñan un papel importante, ya que en esta etapa se determinan los materiales de los que va a estar constituida la estructura, la forma global de la misma, el arreglo, dimensiones y características esenciales de los elementos estructurales. De la correcta elección del sistema estructural dependerá la efectividad de los resultados.
- *Análisis.* Aquí se determinarán los efectos que tendrán las cargas o acciones que actúen en la estructura durante su vida útil. A grandes rasgos el procedimiento de análisis es el siguiente:



- a) Elaboración del modelo de la estructura
  - b) Estimación de las acciones de diseño
  - c) Evaluación de los efectos de las acciones de diseño
- *Dimensionamiento.* En esta etapa se definen las características geométricas de los elementos estructurales que conformarán la estructura con base en las etapas anteriores y se elaborarán los planos y especificaciones de construcción de la estructura.

Cabe señalar que, en todo el proceso de diseño, los códigos desempeñan un papel de total importancia, ya que definen las cargas que introducen esfuerzos en la estructura, los criterios de seguridad e inclusive los procedimientos de diseño. El vínculo entre los responsables del diseño y los códigos es fundamental, ya que además de ser un respaldo ante fallas que se puedan presentar durante la vida útil de la estructura, son la garantía de seguridad para los ocupantes de la misma.

Los códigos o normas son resultado de múltiples estudios y han ido evolucionando con el tiempo al igual que han sido modificados conforme avanza la tecnología y la capacidad intelectual del ser humano.

A lo largo del tiempo, las estructuras pasaron de ser construidas con base en pruebas y errores de manera puramente empírica, a ser construidas siguiendo un sistema elaborado regido por expresiones matemáticas basadas en estudios que dan la pauta para el diseño.

El origen de los códigos o normas se basa, entre otros acontecimientos históricos, principalmente en los primeros intentos de sistematización del proceso de diseño, los cuales consistieron en el establecimiento de reglas geométricas para materiales y elementos constructivos dados, con el objeto de asegurar su estabilidad. Después de que se popularizó el método experimental, los procedimientos de diseño se volvieron más refinados.

En la actualidad, la automatización de los diversos procesos incluidos en el diseño es muy común, gracias al creciente avance de la tecnología y a la existencia de múltiples programas computarizados que permiten el dimensionamiento, análisis, elaboración de planos estructurales, etc. Esto permite una disminución de tiempo, redundar en una mayor eficacia y precisión en el diseño, siempre y cuando se tenga un criterio de interpretación lógico a los resultados que arrojen estos programas.

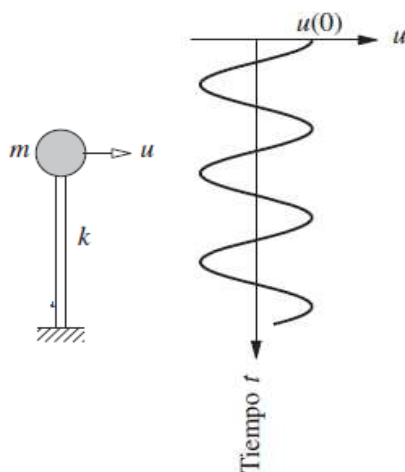
Un elemento muy importante en el análisis de estructuras es la dinámica estructural. El término *dinámico* se define de manera simple como una variación en el tiempo, por lo tanto, una carga dinámica es aquella, en la cual su magnitud, dirección y/o posición varía con el tiempo. De manera análoga, la respuesta estructural de la o las cargas dinámicas, son esfuerzos y deformaciones que varían con el tiempo, es decir, se trata de una respuesta dinámica. En general, la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas se expresa en función de los desplazamientos de la estructura.

Las propiedades básicas esenciales de cualquier sistema estructural elástico lineal sujeto a un conjunto de fuerzas o cargas dinámicas son su masa, propiedades elásticas como la flexibilidad o rigidez, y el mecanismo de disipación de energía o amortiguamiento.

Todos los códigos existentes contemplan tanto el efecto estático como el dinámico ya que, para el caso de la acción del viento, además de provocar efectos estáticos, también provoca efectos dinámicos causados por la frecuencia de las ráfagas. Cabe señalar que, para contemplar los efectos dinámicos debidos al viento en el diseño estructural, se involucra el uso de factores que afectan las presiones actuantes en las estructuras

### 1.1. Sistemas de un grado de libertad

Una estructura simple es la idealización de un sistema como una masa concentrada soportada por una estructura considerada sin masa pero que aporta rigidez en la dirección lateral. Si dicho sistema se somete a un desplazamiento inicial en la dirección lateral, al ser liberado, comenzará a oscilar (figura 1). A este fenómeno se le denomina *vibración libre*.



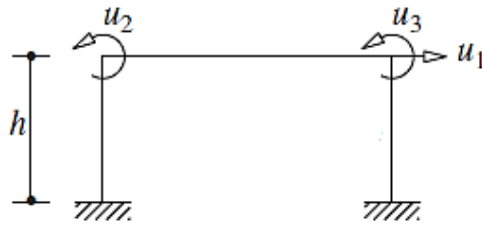
**Figura 1** Sistema de un grado de libertad (izq). Sistema oscilando (der). (Chopra K., 2014)

Si no hay un mecanismo que permita la disipación de la energía, el sistema no dejará de oscilar. Al proceso mediante el cual la amplitud de la vibración disminuye de manera constante se denomina *amortiguamiento*.

Los elementos estructurales de una estructura real que contribuyen a las propiedades inerciales (masa), elásticas (rigidez) y de disipación de la energía son las vigas, columnas, muros, etc. Cada una de estas propiedades se concentran en tres componentes: la componente de masa, la componente de rigidez y la componente de amortiguamiento.

Un concepto básico en la idealización de estructuras, para análisis dinámico, es el de *grados de libertad*. Los grados de libertad son el número de posibles desplazamientos independientes para definir las posiciones finales con relación a las originales de todas las masas después de ser afectadas por una fuerza o desplazamiento externo. Por ejemplo, en un marco simple que se

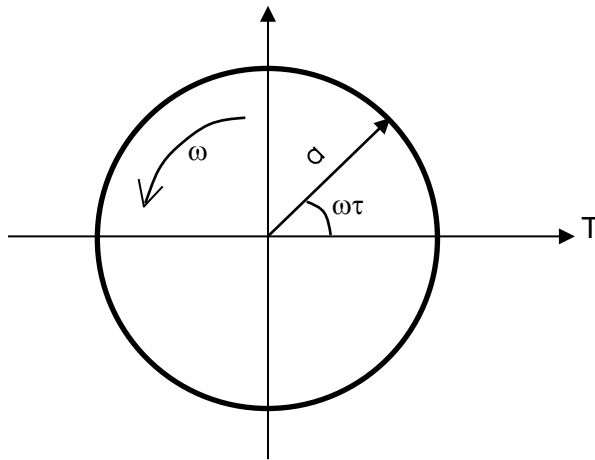
encuentra empotrado en la base, tiene tres grados de libertad, esto es que, al aplicarle una fuerza externa presentará un desplazamiento lateral y dos más debidos a la rotación de los nodos del marco:  $u_1, u_2$  y  $u_3$ , respectivamente (figura 2).



**Figura 2 Grados de libertad de un marco rígido (Chopra K., 2014)**

Una estructura continua tiene un número infinito de grados de libertad, pero la idealización de dicha estructura como un sistema de uno o varios grados de libertad permiten que la información que se adquiere de dicho sistema baste para comprender el comportamiento del sistema real, incluyendo las especificaciones de diseño y seguridad.

El comportamiento de un sistema de un grado de libertad puede ser representado como el movimiento de una partícula. Este movimiento, a su vez, puede ser representado por medio de un vector que rota (figura 3).



**Figura 3 Representación de un vector que rota**

Las proyecciones vertical y horizontal del vector sobre los ejes del plano, pueden ser empleadas para representar el movimiento de una partícula donde las ecuaciones que definen dicho movimiento son las siguientes:

$$H_v = a \cos(\omega t) \tag{1.1}$$

$$V_v = a \sen(\omega t) \tag{1.2}$$

Donde:

- $a$  vector que representa la posición inicial de una partícula en un plano.
- $H_v$  proyección horizontal de un vector en un plano.
- $V_v$  proyección vertical de un vector en un plano.
- $t$  tiempo, en segundos.
- $\omega$  velocidad angular de un vector que rota, en rad/s.

Si se considera una de las proyecciones, por ejemplo, la horizontal en un plano con respecto al tiempo, se obtiene algo similar a un sistema de un grado de libertad en oscilación (figura 1). Se puede decir entonces que, el fenómeno que se está representando, es el de vibración de una partícula.

Con lo planteado anteriormente, es posible definir los parámetros del comportamiento de la partícula si se emplea el concepto de la derivada de una función con respecto a una variable, ya que si se deriva la función que define el desplazamiento de la partícula, es posible determinar la velocidad con la que se mueve y su aceleración.

Sea la ecuación 1.1, que define el desplazamiento de la partícula y al aplicar el concepto de la derivada de una función, se tiene:

$$x_p = X_0 \cos(\omega t) \text{ (Desplazamiento)} \quad (1.3)$$

$$\frac{d}{dt} x_p = \frac{d}{dt} X_0 \cos(\omega t)$$

$$\dot{x} = -\omega X_0 \text{sen}(\omega t) \text{ (Velocidad)} \quad (1.4)$$

$$\frac{d}{dt} \dot{x} = \frac{d}{dt} (-\omega X_0 \text{sen}(\omega t))$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 X_0 \cos(\omega t) \text{ (Aceleración)} \quad (1.5)$$

Donde:

- $X_0$  posición inicial de la partícula en un instante de tiempo.
- $x_p$  desplazamiento de una partícula.
- $\dot{x}$  primera derivada del desplazamiento, representa la velocidad de una partícula con respecto al tiempo.
- $\ddot{x}$  segunda derivada del desplazamiento, representa la velocidad de una partícula con respecto al tiempo.

Las ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.5 son la base teórica de lo que se conoce como *ecuación de equilibrio dinámico*. El principio de D' Alembert establece que un sistema puede ser puesto en equilibrio

dinámico (sin amortiguamiento) agregando fuerzas externas a una fuerza ficticia, comúnmente conocida como *fuerza de inercia*.

Entonces, la ecuación de equilibrio dinámico (sin amortiguamiento) queda definida de la siguiente manera:

$$m\ddot{x} + kx_p = 0 \quad (1.6)$$

Donde:

$k$  rigidez de un sistema, en N/m.

$m$  masa de un sistema, en kg.

En el siguiente apartado, se retomará la ecuación de equilibrio dinámico con un término adicional, el de amortiguamiento.

### 1.1.1. Fuerza de amortiguamiento

Como se mencionó anteriormente, el proceso mediante el cual la vibración libre disminuye de manera constante se denomina *amortiguamiento*. En el amortiguamiento, la energía de vibración se disipa por diversos mecanismos y, con frecuencia, más de un mecanismo está presente en un mismo instante de tiempo. En las estructuras reales, múltiples mecanismos contribuyen a la disipación de energía. Algunos de los mecanismos presentes en las estructuras son la fricción en las conexiones de acero, la apertura y cierre de microfisuras en el concreto y la fricción entre la estructura principal y los elementos no estructurales como lo son muros divisorios. Para describir o identificar matemáticamente cada uno de estos mecanismos, que permiten la disipación de la energía en una estructura real, se vuelve prácticamente imposible.

En este sentido, se opta por seleccionar un valor que represente la aportación de todos los mecanismos de disipación de energía. A dicho valor se le conoce como *coeficiente de amortiguamiento* y está en función, principalmente, del material con el que está constituida la estructura.

El coeficiente de amortiguamiento no puede ser calculado a partir de las características geométricas de los elementos estructurales, a diferencia de la rigidez, la cual se calcula a partir de las dimensiones de cada elemento estructural. Debido a que no es posible identificar todos los mecanismos que disipan la energía de vibración de las estructuras, los experimentos en dichas estructuras, proporcionan datos para evaluar el coeficiente de amortiguamiento.

Con base en el concepto anterior, es posible definir la ecuación de equilibrio dinámico, ahora con tres componentes del sistema estructural, donde el término adicional, es el de amortiguamiento. A esta ecuación se le conoce también como *vibración forzada con amortiguamiento* y se define de la siguiente manera:

$$m\ddot{x} + c_a\dot{x} + kx_p = p(t) \quad (1.7)$$

Donde:

$c_a$  coeficiente de amortiguamiento de un sistema, adimensional.

$k$  rigidez de un sistema, en N/m.

$m$  masa de un sistema, en kg.

$p(t)$  carga aplicada a un sistema en dirección del desplazamiento.

$x_p$  desplazamiento de una partícula.

$\dot{x}$  primera derivada del desplazamiento, representa la velocidad de una partícula con respecto al tiempo.

$\ddot{x}$  segunda derivada del desplazamiento, representa la aceleración de una partícula con respecto al tiempo.

En la ecuación 1.7, las fuerzas que actúan en la dirección del desplazamiento es la carga aplicada  $p(t)$ , donde las tres fuerzas resistentes derivadas del movimiento son: la fuerza de inercia, fuerza de amortiguamiento y fuerza elástica.

De acuerdo con el principio de D'Alembert, la fuerza inercial se define como el producto de la masa por la aceleración.

$$F_I = m\ddot{x} \quad [N] \quad (1.8)$$

La fuerza de amortiguamiento, se define como el producto entre el coeficiente de amortiguamiento por la velocidad.

$$F_D = c_a\dot{x} \quad [N] \quad (1.9)$$

Finalmente, la fuerza elástica es el producto de la rigidez por el desplazamiento.

$$F_E = kx \quad [N] \quad (1.10)$$

Donde las variables expresadas en las tres ecuaciones de las fuerzas resistentes fueron definidas anteriormente.

### 1.1.2. Respuestas estáticas y dinámicas

Las respuestas de las estructuras dependen estrictamente de las acciones. Generalmente a las acciones se les denominan cargas, pero esencialmente, las acciones son todos aquellos agentes externos que inducen fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones en la estructura.

Es posible definir la respuesta de una estructura como aquella representada por un conjunto de parámetros físicos que describen el comportamiento de la estructura ante las acciones que le son aplicadas.

Estos dos conceptos anteriores se relacionan con lo que se denomina *estados límite*. Los estados límite son cualquier etapa del comportamiento de una estructura, a partir de la cual, su respuesta se considera inaceptable. Existen dos tipos de estados límite, los de servicio y los de falla.

Los estados límite de servicio son todas aquellas situaciones que afectan su correcto funcionamiento, pero que a su vez no representan un riesgo para la seguridad de la estructura. Ejemplo de lo anterior son: las flechas, desplazamientos horizontales, vibraciones, agrietamientos, etc.

Por el contrario, los estados límite de falla corresponden a diversas situaciones en las cuales, la estructura sufre algún daño total o parcial y que no permiten soportar nuevas acciones. Ejemplo de lo anterior es la falla de una sección por cortante, flexión, torsión, carga axial o cualquier combinación de dichos efectos.

Para comprender las respuestas tanto estáticas como dinámicas, es importante señalar la diferencia entre el problema estructural estático y el dinámico. En primer lugar, por definición, el problema dinámico se basa naturalmente en la variación con respecto al tiempo, como se mencionó anteriormente. Pero a pesar de que, estrictamente, el problema estático también varía con el tiempo, este presenta una solución singular a diferencia del dinámico

Otra distinción entre estos dos problemas estructurales, se puede representar mediante una viga simplemente apoyada donde se le aplique una carga estática y una dinámica (figura 4). En el caso de la viga con carga estática, su respuesta estará en función únicamente de dicha carga y se podrá analizar estableciendo los principios de equilibrio de fuerzas. Por otro lado, la respuesta de la viga con carga dinámica, no solo dependerá de la carga sino también de las fuerzas inerciales que se oponen a las aceleraciones que le producen. Por lo tanto, sus correspondientes momentos y cortantes inerciales en la viga deberán equilibrar no solo la fuerza externa aplicada, sino también las fuerzas inerciales producto de las aceleraciones de la viga.

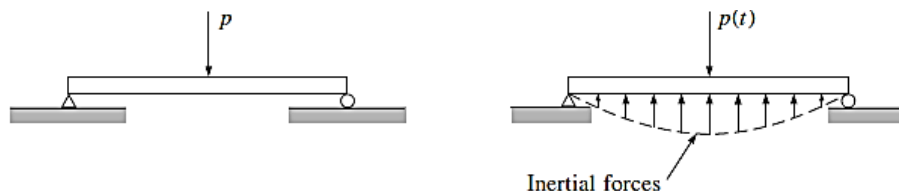


Figura 4 Viga con carga estática (izq.). Viga con carga dinámica (der) (Clough W & Penzien, 1995)

## 1.2. Viento

El término utilizado para referirse al movimiento de masas de aire es conocido como *viento* y es generado gracias a diferencias de presión en distintas zonas de la atmósfera y a la rotación de la tierra. El movimiento del aire en dirección vertical o casi vertical es llamado *corriente*. En el diseño

estructural, importan las altas velocidades del viento y fenómenos atmosféricos excepcionales. Por esto mismo, el viento es considerado como una acción accidental.

En áreas urbanas, la zona de turbulencia se extiende a una cierta altura sobre el nivel del suelo, a partir de esta altura, el flujo horizontal del aire ya no es afectado por la rugosidad del terreno. A esto se le conoce como *capa límite*. La velocidad del viento a esta altura es conocida como *velocidad gradiente*. El efecto del viento en esta zona es un factor importante y motivo de interés.

A pesar de que no es posible ver el viento, su flujo se considera bastante complejo y a su vez turbulento en la naturaleza. Si una persona se encuentra caminando en un día con mucho viento, no queda duda de que experimentará un flujo constante del mismo, pero en ciertos periodos de tiempo, será testigo de repentinas ráfagas de viento. Esta variación repentina en la velocidad del viento, llamada *turbulencia*, juega un papel importante en la determinación de oscilaciones y desplazamientos de las estructuras.

### **1.2.1. Consideraciones de diseño**

Las tormentas y huracanes generan una variedad de problemas en los edificios, particularmente en edificios altos, lo que provoca preocupaciones a los dueños, aseguradoras e ingenieros de igual manera. Los vientos provocados por los huracanes son la principal causa de pérdidas económicas en desastres naturales, en algunas ocasiones por encima de los terremotos e inundaciones.

En el diseño por viento, una construcción no puede ser considerada aislada, es decir, sin construcciones u obstrucciones en sus alrededores. La influencia de las construcciones vecinas y de la configuración del suelo en el sentido de la respuesta de la estructura, puede ser sustancial. La influencia del viento en la parte alta de edificios no puede pasar desapercibida, ya que puede causar preocupación para los ocupantes de los últimos pisos debido a vibraciones excesivas. No existe suficiente evidencia de que los vientos, excepto aquellos generados por tornados o huracanes, hayan causado un daño estructural mayor en construcciones nuevas. Sin embargo, un rascacielos moderno, de peso “ligero”, materiales de alta resistencia, fachadas de materiales ligeros, etc., es más propenso a problemas generados por la acción del viento que los primeros rascacielos, los cuales contaban con muros de mampostería, fachadas de roca pesada y grandes elementos estructurales.

En zona de huracanes, todas las construcciones son afectadas, pero el movimiento (aceleración) en las construcciones altas compuestas de materiales pesados, usualmente son imperceptibles y no habría motivo de preocupación. En cambio, con las innovaciones estructurales y la tecnología de materiales ligeros para la construcción, se han reducido las características de rigidez, masa y de amortiguación en las estructuras modernas. En las construcciones que experimentan problemas debidos a la acción del viento, los objetos tienden a vibrar, las puertas y candelabros o lámparas colgantes a balancearse, marcos a inclinarse y libros a caerse de las repisas. Si la construcción comienza a presentar movimientos debidos al viento, sus ocupantes pueden llegar a tener la ilusión de que todo en el exterior se está moviendo, creando síntomas de vértigo y desorientación. En tormentas más violentas, se llegan a romper vidrios (figura 5), creando



problemas de seguridad para los peatones a nivel de calle. En algunas ocasiones, se llegan a generar sonidos que son escuchados por los ocupantes a medida que el viento sacuda los elevadores y produzca silbidos en los alrededores.



**Figura 5 Daños en ventanas por la acción del viento (Pulmig, 2018)**

Debido a los posibles problemas que causa la acción del viento, algunos de los criterios básicos a tomar en cuenta para el diseño por viento son:

- Resistencia y estabilidad.
- Fatiga en elementos estructurales y conexiones, causada por los cambios en las cargas de viento.
- Desplazamiento lateral excesivo que puede causar agrietamientos en muros y acabados, desalineaciones de los sistemas mecánicos y posibles deformaciones de elementos no estructurales.
- Frecuencias y amplitudes de importancia que puedan causar incomodidad a los ocupantes de edificios altos y/o flexibles.
- Posible incremento en la magnitud de las velocidades de viento en construcciones aledañas.
- Perturbaciones acústicas molestas.

### **1.2.2. Tipos de viento**

El viento, para efectos de diseño, se puede clasificar en tres principales tipos: viento predominante, viento estacional y viento local.

- *Vientos predominantes.* El aire superficial moviéndose hacia el cinturón ecuatorial de baja presión es llamado viento predominante. En el hemisferio norte, el viento proveniente del norte hacia el ecuador es desviado hasta convertirse en noreste debido a la rotación de la tierra y es conocido como viento predominante del noreste. El mismo fenómeno del viento en el hemisferio sur es llamado viento predominante del sureste.
- *Vientos estacionales.* El aire cercano al suelo es más cálido en verano y más frío en invierno que el adyacente a los océanos durante las mismas estaciones del año. Durante el verano,

los continentes se vuelven zonas de baja presión, con vientos soplando desde los océanos más fríos. En invierno, los continentes experimentan altas presiones con vientos dirigidos hacia los océanos más cálidos. Estos movimientos de aire causados por la diferencia de presiones son llamados vientos estacionales.

- *Vientos locales.* Los vientos locales son aquellos asociados al fenómeno regional e incluyen torbellinos y tormentas eléctricas. Estos son causados por los cambios diarios de temperatura y de presión, generando efectos locales en los vientos.

Estos tres tipos de viento son de igual importancia en el diseño. Sin embargo, para propósitos de evaluar las cargas por viento, las características de los vientos tanto predominantes como estacionales son analíticamente estudiados de manera conjunta, mientras que aquellas de los vientos locales son estudiados individualmente. Esta clasificación es para distinguirlos de las muy diferentes escalas de variaciones de los vientos. La velocidad de los vientos predominantes y estacionales varían en un periodo de varios meses, mientras que para los vientos locales varían casi cada minuto. Las variaciones en la velocidad de los vientos predominantes y estacionales son denominadas como fluctuaciones en la velocidad media. Las variaciones en los vientos locales, se denominan *ráfagas*.

El flujo del viento, a diferencia de otros fluidos, no es estable y varía de manera aleatoria con respecto al tiempo. Debido a esto, las velocidades del viento son contempladas en conjunto con la estadística y periodos de retorno.

### **1.3 Características del viento**

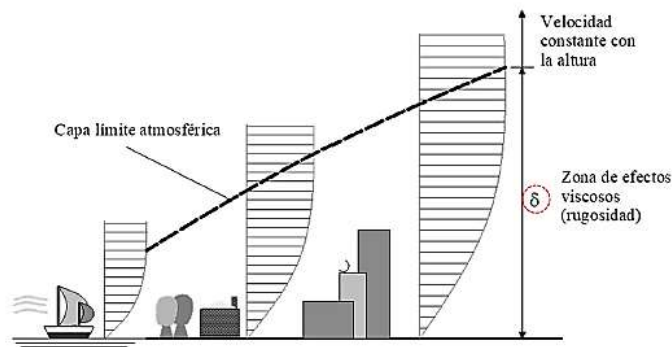
El flujo del viento es complejo debido a múltiples situaciones que surgen de la interacción del viento con las estructuras. Sin embargo, en la ingeniería de viento, se hacen simplificaciones para llegar a la determinación de cargas debidas al viento considerando las siguientes características:

- Variación de la velocidad del viento con la altura.
- Turbulencia del viento.
- Aproximación probabilística.
- Generación del fenómeno de vórtices.
- Naturaleza dinámica de la interacción del viento con las estructuras.

#### **1.3.1. Variación de la velocidad del viento con la altura**

La viscosidad del aire reduce su velocidad adyacente a la superficie de la Tierra a casi cero. Un efecto de retraso ocurre en las capas del viento cercanas al suelo, y esas capas internas a su vez, ralentizan sucesivamente las capas más lejanas. La desaceleración disminuye en cada capa conforme se incrementa la altura, y eventualmente se torna despreciablemente pequeña. La altura en la cual la velocidad deja de incrementarse es llamada altura gradiente, y su correspondiente velocidad, velocidad gradiente. Esta característica de la variación de la velocidad del viento con la

altura es un fenómeno bien conocido, como es evidenciado en las altas presiones de diseño asignadas en elevaciones altas en la mayoría de los códigos o normas de construcción (figura 6).



**Figura 6 Perfil de velocidades asociado a distintas rugosidades del terreno**

A alturas de aproximadamente 400 m por encima del suelo, la velocidad del viento es prácticamente no afectada por la fricción que provoca el mismo, y su movimiento es únicamente dependiente de los efectos de los vientos predominantes, estacionales y locales. La altura a través de la cual la velocidad del viento es afectada por la topografía se denomina *capa límite atmosférica*. El perfil de velocidades de viento dentro de esta capa es considerado de manera general, en la literatura, por la siguiente expresión:

$$V_z = V_g \left( \frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (1.11)$$

Donde

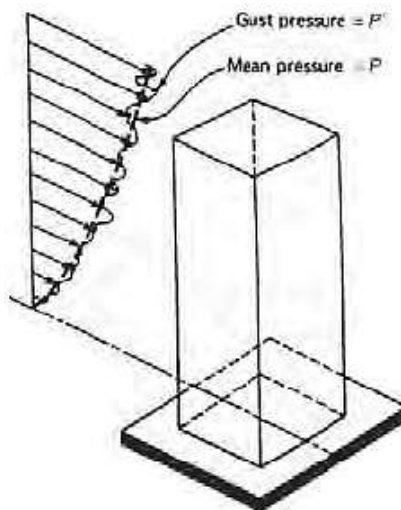
- $V_z$       velocidad media del viento a la altura  $z$ .
- $V_g$       velocidad gradiente.
- $z$         altura por encima de la superficie del suelo.
- $z_g$       altura nominal de la capa límite, la cual depende de la exposición.
- $\alpha$         coeficiente de ley de potencia.

### 1.3.2. Turbulencia del viento

Como se sabe, una característica principal del viento es la turbulencia. Una definición matemática concisa de la turbulencia es difícil de dar, excepto para establecer que ocurre en el flujo del viento debido a que el aire posee una densidad muy baja ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ). Cualquier flujo de aire a una velocidad mayor que 1 o 1.3 m/s (dependiendo de las condiciones atmosféricas y de temperatura de la zona de estudio) es turbulento, causando que las partículas de aire se muevan de manera

aleatoria en todas direcciones. Esto es en contraste con el flujo laminar de las partículas de fluidos pesados, las cuales se mueven predominantemente de manera paralela a la dirección del flujo.

Para propósitos de ingeniería estructural, la velocidad del viento puede ser considerada compuesta por dos componentes, una componente de la velocidad media que se incrementa con la altura y una velocidad turbulenta, que varía con el tiempo. Así como la velocidad del viento fluctúa en la dirección del flujo, también lo hace con la altura (figura 7).



**Figura 7 Representación del comportamiento fluctuante del viento con la altura (Bungale S., 2005)**

### 1.3.3. Aproximación probabilística

En muchas ciencias de la ingeniería, la intensidad de ciertos eventos es considerada una función del periodo de retorno. Por ejemplo, en hidrología la intensidad de lluvia esperada en una región es considerada en términos de un periodo de retorno debido a que, dicho evento que es esperado una vez cada 10 años, es menor que el esperado una vez cada 50 años. De manera similar ocurre con el viento, donde su velocidad varía en función de periodos de retorno.

Es una práctica común considerar que la probabilidad de sobreesforzar una estructura es mucho menor gracias a los factores de seguridad y valores conservadores usados en el diseño. Por lo tanto, es importante comprender la noción de la probabilidad de ocurrencia en el diseño de las velocidades del viento durante la vida útil de las estructuras.

La expresión general para conocer una probabilidad,  $P$ , en que una velocidad de diseño sea excedida al menos una vez durante el periodo de exposición de,  $n$ , años es dada por:

$$P = 1 - (1 - P_a)^n \tag{1.12}$$

Donde:

$P$  probabilidad de un evento de ser excedido durante un periodo de tiempo.

$P_a = \frac{1}{r}$  probabilidad anual de ser excedida (recíproco del periodo de retorno).

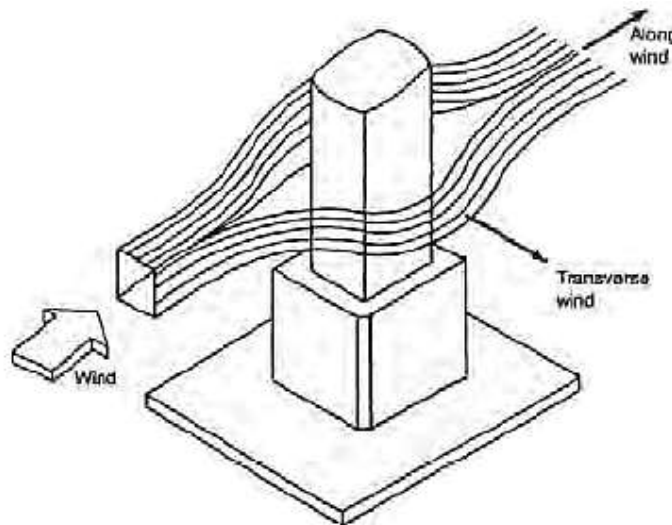
$n$  periodo de exposición en años.

La ecuación 1.12, es conocida como *función de probabilidad de riesgo* y tiene múltiples aplicaciones en distintas áreas de la ingeniería, así como en otras ciencias. Es muy utilizada en la llamada Teoría de Juegos y una de sus aplicaciones es para conocer la probabilidad de que salga un número, de los 6 totales, contenidos en un dado.

En la normatividad de viento vigente en México, existen valores de velocidades de viento según la región en la que se encuentre y en función de periodos de retorno de 10, 50 y 200 años. Estas velocidades regionales se encuentran en un mapa de la República Mexicana denominado *Mapa de Isotacas* y permiten conocer la velocidad predominante para una región o ubicación en particular.

#### 1.3.4. Vórtices, número de Strouhal y el efecto de resonancia

En general, la interacción del flujo del viento sobre un cuerpo se divide en tres direcciones perpendiculares, dando origen a fuerzas y momentos alrededor de las tres direcciones. En ingeniería civil, la fuerza y el momento correspondiente a la componente vertical son de menor importancia, por ende, aparte de las fuerzas de levantamiento en grandes áreas de azotea, el flujo del viento es simplificado y considerado bidimensional, que consiste en *viento longitudinal* y *viento transversal* (figura 8).

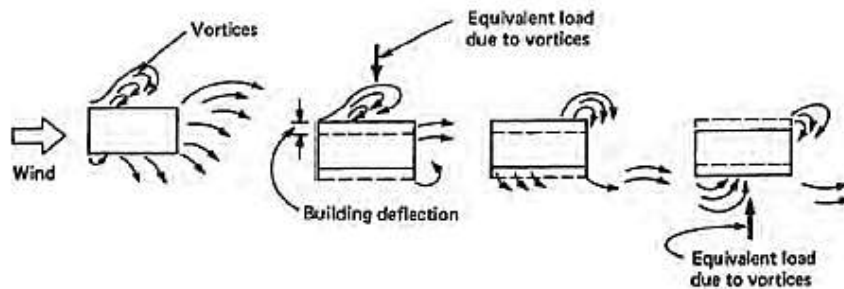


**Figura 8 Representación bidimensional del viento actuando en las estructuras (Bungale S., 2005)**

El viento longitudinal es el término utilizado para referirse a fuerzas de arrastre, y el viento transversal, como su nombre lo indica, es el término utilizado para describir las fuerzas que actúan de manera transversal al flujo. La respuesta del viento transversal que causa movimiento en un plano perpendicular a la dirección del viento, generalmente domina sobre la respuesta del viento

longitudinal para edificios altos. En un edificio prismático sometido a un flujo suave del viento, las líneas de corriente paralelas al flujo son desplazadas a cualquier lado del edificio. Esto resulta en vórtices en espiral siendo generados periódicamente de los lados hacia el flujo viento abajo, a esto se le conoce como *estela*. A velocidades relativamente bajas, de alrededor de 22 a 27 m/s, los vórtices son desprendidos simétricamente en pares, uno de cada lado del edificio. Cuando se generan los vórtices, estos se separan de la superficie del edificio, entonces un empuje es aplicado en la dirección transversal.

Cuando las velocidades del viento son bajas, desde que el desprendimiento de vórtices ocurre en un mismo instante en cada lado del edificio, no hay tendencia del edificio a vibrar en la dirección transversal. Es, por tanto, sujeto a oscilaciones paralelas al flujo del viento. A velocidades altas, los vórtices se generan alternadamente, primero de un lado y luego del otro. Cuando esto sucede, existe un empuje paralelo a la dirección del viento como anteriormente se explicó, pero además existe uno en la dirección transversal. Los empujes transversales son entonces aplicados alternadamente hacia la izquierda y luego hacia la derecha. La frecuencia de éstos son precisamente la mitad de los correspondientes al viento longitudinal. Este tipo de desprendimiento, el cual da origen a vibraciones estructurales en la dirección del flujo, así como en la dirección transversal, es llamado *efecto de vórtices de Von Karman*, un fenómeno bien conocido en el campo de la mecánica de fluidos (figura 9).



**Figura 9** Proceso de generación de vórtices de Von Karman sobre un elemento (Bungale S., 2005)

### Número de Strouhal

Existe una fórmula para calcular la frecuencia de las fuerzas transversales causadas por el desprendimiento de vórtices, la cual es la siguiente:

$$f = \frac{V \times S_t}{D} \quad (1.13)$$

Donde:

$D$       diámetro de una estructura cilíndrica, en m.

$f$         frecuencia de desprendimiento de vórtices, en Hz.

$S_t$  número de Strouhal, adimensional.

$V$  velocidad media del viento, en m/s.

El número de Strouhal no es constante y varía de manera irregular con la velocidad del viento. A velocidades bajas del viento, el número de Strouhal es pequeño y comienza a incrementarse con la velocidad hasta un valor de 0.21 como límite para un cilindro suave. Este límite es alcanzado con velocidades de alrededor de los 22 m/s y permanece casi constante con valor de 0.20 para velocidades de viento entre 22 y 51 m/s.

### **Efecto de Resonancia**

Cuando la velocidad del viento es tal que, la frecuencia que provoca es aproximadamente la misma que la frecuencia natural de la estructura, se genera un efecto de resonancia. Después de que la estructura ha comenzado a resonar, un porcentaje pequeño de nuevos incrementos en la velocidad del viento no alterarán la frecuencia de la estructura. La estructura vibra con la frecuencia resonante dentro de un intervalo de velocidades que no la alteran. Para velocidades de viento ya sea por debajo o por encima de dicho intervalo, el desprendimiento de vórtices no se vuelve crítico.

El desprendimiento de vórtices ocurre para diferentes formas estructurales. El valor del número de Strouhal para dichas formas es determinado en pruebas en túnel de viento, midiendo la frecuencia de desprendimiento para un cierto intervalo de velocidades.

#### **1.3.5. Naturaleza dinámica del viento**

A diferencia del flujo medio del viento, el cual puede ser considerado estático, las cargas de viento asociadas a las ráfagas o turbulencia cambian rápida e incluso abruptamente, creando efectos mayores que si se aplicaran gradualmente. Las cargas de viento, por otro lado, necesitan ser estudiadas como si fueran dinámicas en la naturaleza. La intensidad de la carga debida al viento depende de que tan rápido varía y también de la respuesta de la estructura. Por lo tanto, si las presiones generadas por una ráfaga de viento, la cual se incrementa primero y luego disminuye, es considerada dinámica o estática dependiendo en gran medida de la respuesta dinámica de la estructura.

Para ejemplificar lo anterior, se considera un edificio de más de 200 metros de altura sujeto a ráfagas de viento. Bajo la acción del viento, la construcción se balancea levemente. El primer movimiento es en la dirección del viento y luego comienza a oscilar de atrás hacia adelante. Después de iniciado el movimiento en la dirección del viento, la parte más elevada de la estructura pasa por la posición inicial para después moverse en dirección opuesta, y continúa oscilando de atrás hacia adelante hasta que eventualmente se detiene. El tiempo que le toma a una estructura en completar un ciclo de oscilación completa es conocido como *periodo*. Este periodo varía en función de las características y materiales de cada edificio. La acción de las ráfagas de viento depende no solo de qué tanto le tome a la ráfaga en llegar a su máxima intensidad y en disminuirse de nuevo, sino también del periodo de la misma estructura. Si las ráfagas de viento alcanzan su

máximo valor y desaparecen en un tiempo mucho menor que el periodo de la estructura, su efecto es dinámico.

Por otro lado, las ráfagas pueden ser consideradas como cargas estáticas si las ráfagas del viento incrementan y desaparecen en un tiempo mucho mayor que el periodo de la estructura. Por ejemplo, si una ráfaga de viento que alcanza su máxima intensidad y luego se reduce a cero en 2 segundos, se trata de una carga dinámica para un edificio alto con periodo de 5 a 10 segundos, esa misma ráfaga con periodo de 2 segundos, se traduce en una carga estática para un edificio bajo con periodo menor a 2 segundos.

### 1.3.6. Presiones debidas al viento

La falla o ruptura del recubrimiento exterior de una estructura, el rompimiento de cristales, etc., requiere una cuidadosa consideración a la hora del diseño, debido a que representan un peligro tanto para los ocupantes del edificio como para los peatones en el exterior.

Se ha vuelto indispensable obtener información de diseño acerca de la distribución de las presiones debidas al viento sobre la superficie de una estructura mediante pruebas en túnel de viento. Los cristales en muros de una estructura, no solo deben resistir grandes fuerzas, particularmente en edificios altos, sino también deben ser diseñados de manera que permitan reacomodar distorsiones de toda la estructura.

Por ello, conocer las zonas donde las presiones son mayores en una estructura se vuelve parte importante del diseño e intrínsecamente de la determinación de factores de presión contenidos en la normatividad. Lo anterior conlleva a una previa determinación de la distribución de presiones y succiones debidas al viento.

Cuando el aire fluye alrededor de los bordes de una estructura, las presiones resultantes en las esquinas son, por mucho, más elevadas que en el centro de la misma elevación. Esto ha sido evidenciado por los daños causados en ventanas ubicadas cerca de las esquinas de los edificios, en esquinas de naves industriales, en aleros, en tejas de techos de viviendas, etc., durante las tormentas y huracanes (figura 10).



*Figura 10 Daños en bordes de estructuras ligeras (Avelar Frausto, 2017)*



Estudios en túnel de viento de modelos a escala indican que, tres áreas distintas de presión son identificadas alrededor de una estructura.

- Área de presión positiva en la cara de barlovento.
- Áreas de presión negativa (succiones) en las esquinas de barlovento.
- Área de presión negativa (succión) en la cara de sotavento.

De las tres áreas, las presiones con mayor intensidad se concentran en las esquinas de la cara de barlovento. Las presiones en la superficie de un edificio no son constantes, pero varían continuamente. Las presiones positivas en la cara de barlovento varían más que las negativas en la cara de sotavento. La zona de presiones negativas o succiones, permanece estable en comparación con la zona de presiones positivas. El cambio de presión es aleatorio y varía de un punto a otro sobre la superficie del edificio. Por lo tanto, el diseño de acabados o recubrimientos exteriores está fuertemente influenciado por las presiones locales.

El o los esfuerzos de un cristal, en realidad de ningún otro material de recubrimiento, no son conocidos de la misma manera en que se conocen los esfuerzos del concreto o el acero. Por ejemplo, no es posible comprar un cristal basados en el criterio del límite elástico como en el caso del acero. Existen curvas de resistencia de cristales que son proporcionadas por el fabricante y que permiten determinar sus dimensiones y espesor basados en datos estadísticos.

Es importante identificar dos tipos de cargas de presión independientemente de la clasificación basada en la dirección en la que actúan (positiva o negativa). Estos dos tipos de cargas son las globales y las locales. Las cargas de presión globales debidas al viento consisten en una combinación de presiones positivas y negativas alrededor de la estructura, mientras que las cargas de presión locales son aquellas que actúan en áreas específicas de la estructura y que son necesarias para el diseño de elementos de recubrimiento y sus uniones con la estructura. Ambas se diferencian significativamente y es importante comprender dichas diferencias. Estas son:

#### Presiones Locales

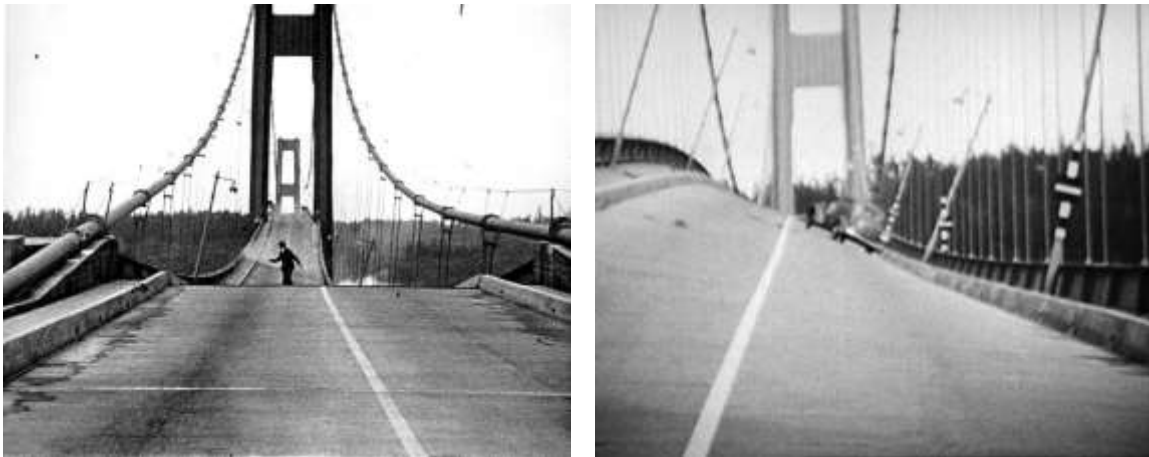
- Los vientos locales son más influenciados por la configuración de la estructura.
- La carga local de presión es la máxima carga que ocurre en cualquier punto de la estructura en cualquier momento.
- La intensidad y característica de las cargas de presión locales para cualquier dirección y velocidad del viento, cambia sustancialmente en varias partes de la superficie de la estructura.
- Las presiones internas causadas por filtración de aire a través de los sistemas de recubrimiento tienen un efecto considerable en las cargas locales

#### Presiones Globales

- La carga global de presión no es mayormente influenciada por la configuración de la estructura.

- La carga global es la suma de las presiones positivas y negativas presentes simultáneamente sobre toda la superficie de la estructura.
- Se consideran únicamente ráfagas de 2 segundos o más como significantes en la determinación de la carga global crítica.
- Las presiones internas no influyen en el cálculo de la carga global.

No existen antecedentes de estructuras derribadas o daños estructurales causados por la acción del viento comparables con el Puente Tacoma (figura 11). Por otro lado, las fallas locales en techos, ventanas y recubrimientos de muros son más comunes.



**Figura 11 Puente Tacoma en resonancia (Velasco J., 2018)**

La determinación analítica de la presión o succión del viento en una superficie específica de la estructura, considerando la variación de la dirección y velocidad del viento, es un problema complejo. Contribuyendo a esta complejidad están las fluctuaciones de la acción del viento influenciadas por los alrededores y la configuración de la superficie de los mismos muros. Probablemente la mejor opción para dar respuesta al problema es el estudio en túnel de viento.

## Capítulo 2 **NORMATIVIDAD**

### **2.1 Historia de la normatividad en la Ciudad de México**

La normatividad en México ha tenido múltiples cambios a lo largo del tiempo. Algunos de ellos han sido debido a eventos extraordinarios originados por la naturaleza principalmente por sismos con un grado de desastre elevado.

En 1920 se emitió el primer reglamento de Construcciones del Distrito Federal, posteriormente en el mes de Julio de 1957, ocurrió un evento sísmico de magnitud de 7.7 grados aproximadamente, en la escala de Richter en el cual, un monumento emblemático de la Ciudad de México cayó; el denominado Ángel de la Independencia. Dicho evento permitió que se decretaran adiciones al Reglamento a través de normas, las cuales se denominaron Normas de Emergencia y fueron publicadas en el mismo año.

Poco después, fue publicado en el año de 1966, un nuevo Reglamento de Construcciones y aparecen las Normas de la Dirección General de Obras Públicas. Estas normas, fueron la base para la elaboración de las Normas Técnicas Complementarias, las cuales fueron publicadas 11 años después, en 1977. En ese mismo año (1977) las Normas Técnicas Complementarias (NTC) incluyeron las bases para el diseño y construcción de estructuras de concreto, mampostería, acero y de madera. A partir de esa publicación, la primera modificación de las NTC ocurrió en 1984 y dicho cambio fue debido a nuevos avances tecnológicos que permitieron un replanteamiento general de las bases para el diseño estructural.

De nuevo, la Ciudad de México después de casi tres décadas, fue testigo de un evento sísmico que superó los 7.7 grados en la escala de Richter del anterior. Este sismo sacudió la ciudad de México en el mes de septiembre del año 1985 con magnitud de 8.1 en la escala de Richter. Históricamente, fue el evento sísmico registrado más destructor y mortífero en la Ciudad de México donde además de haber sido clasificado como un sismo de magnitud elevada también lo fue en su duración ya que permaneció por un lapso largo de tiempo.

Por lo tanto, dicho evento sísmico representó un motivo obligado para realizar modificaciones a las normas y fue hasta el año de 1987 cuando se publica la quinta edición del Reglamento de Construcciones, las cuales incluyen modificaciones técnicas y administrativas derivadas de la experiencia del sismo de 1985 donde, además, se observó que la mayoría de las construcciones afectadas en aquella época, no cumplían con los requisitos estructurales que establecían las normas.

Tiempo después, previo a otra modificación importante a las normas y al reglamento, aparece una nueva versión del mismo en el año de 1993, pero fue en el mes de febrero del 2004 cuando entra en vigor el nuevo Reglamento de Construcciones, resultado de los nuevos avances tecnológicos y científicos. Con respecto a las NTC, su publicación tuvo que esperar 8 meses después de la publicación del nuevo reglamento, por lo que, en el mes de octubre del mismo año, entraron en vigor las nuevas Normas Técnicas Complementarias.

Finalmente, en el mes de diciembre del 2017 fueron publicadas las modificaciones a las NTC para diseño de cimentaciones, por sismo, por viento, diseño y construcción de estructuras de acero, concreto, madera y mampostería y el apartado correspondiente a la revisión y dictamen de la seguridad estructural de las edificaciones. Por lo que, para fines de este documento, se analizarán exclusivamente las modificaciones a la NTC para diseño por viento.

En años recientes, las cargas por viento especificadas en los códigos han sido perfeccionadas significativamente. Esto se debe principalmente a que el conocimiento, acerca de la forma en que el viento afecta a las estructuras, se ha expandido gracias a la tecnología e investigaciones desarrolladas en el área de la Ingeniería de Viento. Esto ha derivado en una mejor aproximación en la predicción de cargas de viento, por lo que, en la actualidad, se pueden diseñar edificios que satisfagan cargas anticipadas de viento sin llegar a tener valores muy conservadores.

En conclusión, cabe señalar que los fenómenos naturales ocurridos no son las únicas razones de modificación de las normas y reglamentos de construcción. Existen otros motivos por los cuales se realizan modificaciones o actualizaciones, como lo pueden ser avances científicos, tecnológicos, descubrimientos, convención internacional, simplificación de metodologías, etc.

## **2.2 Normativa internacional de viento**

Existen códigos que son reconocidos internacionalmente y que establecen métodos de diseño y cálculo de cargas debidas al viento, que como se comentó anteriormente, también han sido modificados gracias a la evolución de la tecnología y a la adquisición de nuevos conocimientos, donde de igual manera, se percibe la complejidad del problema estructural que representa el viento para las estructuras con el paso del tiempo. Dicha complejidad que resulta en la determinación de las cargas de viento, involucrando todos los factores posibles, se aprecia en los cambios que han sufrido los estándares internacionales.

Si el lector se adentra en el Código Estándar de la Construcción de 1997, (SBC por sus siglas en inglés) podrá apreciar que los requerimientos para las cargas de viento están contenidos en solo página y media a diferencia de ediciones posteriores a la 2002 del ASCE-7, el cual contiene más de 90 páginas de texto, comentarios, figuras y tablas que permiten la predicción de cargas de viento para una estructura en particular.

Entre los códigos más destacados internacionalmente, considerando su constante investigación y especialización en el área de Ingeniería de Viento, y que fueron tomados como referencia para la realización de la normatividad en México, están los siguientes:

- National Building Code of Canada (NBCC 2015): Wind Load Provisions
- Eurocode 1: Actions on Structures

Cabe resaltar que éstos no son los únicos códigos existentes ni son los mejores a nivel internacional, ya que no existe un indicador que permita clasificar a la normatividad de cada país dentro de un intervalo de calidad. Cada nación posee normas o códigos en los cuales se establecen distintos criterios particulares para considerar las cargas de viento y ha realizado

estudios propios que permiten adecuar las expresiones que definen el efecto del viento en las estructuras para la zona geográfica en la que se encuentra.

### 2.2.1 National Building Code of Canada (NBCC 2015): Wind Load Provisions

Posiblemente, el Código Canadiense es uno de los más completos a nivel internacional. Esto se debe a que presenta un método analítico para determinar la respuesta del viento transversal. De igual manera es uno de los códigos para diseño por viento más claros, ya que toma en consideración múltiples características esenciales de los edificios tales como sus dimensiones, forma, rigidez, coeficientes de amortiguamiento, topografía del sitio, clima, capa límite, aerodinámica estructural y teoría de probabilidad.

La ecuación que el Código Canadiense utiliza para determinar las presiones debidas al viento es la siguiente:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.1)$$

Donde:

- $q$  presión que ejerce la velocidad del viento, en kPa.
- $V$  velocidad del viento, en m/s.
- $\rho$  promedio de la densidad del aire en meses donde hay más viento en Canadá.

Dado que la densidad del aire depende principalmente de la temperatura y de la presión atmosférica, los valores de la densidad del aire seco a 0°C y de la presión atmosférica estándar de 1.2929 kg/m<sup>3</sup> son usados como valor promedio para la determinación de presiones. Esta consideración da como resultado una constante que multiplica al cuadrado de la velocidad, con valor de 0.00064645. Por lo que la ecuación 2.1 queda de la siguiente manera:

$$q = 0.00064645 V^2 \quad (2.2)$$

Como se mencionó anteriormente, los valores de las velocidades del viento registrados están asociados a periodos de retorno. Para el caso del Código Canadiense, las ubicaciones de varios de los anemómetros que registraban velocidades del viento en Canadá estaban ubicados en la parte alta de múltiples estructuras y el resto a una altura estándar de 10 metros. Esto representaba una diferencia evidente, ya que como se sabe, la magnitud de las velocidades en la parte alta de edificios es mucho mayor que a 10 metros de altura. Por lo tanto, en la década de los 60's, donde fue necesario, todas las velocidades fueron ajustadas a una altura estándar de 10 metros. La información recabada en los años donde los anemómetros se encontraban instalados en la parte alta de construcciones fueron eliminadas del análisis desde que resultó impráctico para ajustarlas

a los efectos del flujo del viento sobre una estructura. Este cambio se vio reflejado en una reducción de los valores de las velocidades asociadas a un periodo de retorno de 50 años, solo para algunas localidades de Canadá donde se efectuaron dichos cambios.

En cuanto al cálculo de las cargas debidas al viento, el Código Canadiense establece tres métodos para la determinación de las cargas de viento sobre las estructuras:

- Método estático.
- Método dinámico.
- Pruebas en túnel de viento.

Para el diseño de edificios que no son sensibles a cargas dinámicas, se puede usar cualquiera de los tres métodos de diseño mencionados anteriormente. En el caso de que sean sensibles a cargas dinámicas, se debe usar el método dinámico o pruebas en túnel de viento. Por lo que, para identificar si un edificio es poco sensible a cargas dinámicas, se debe cumplir lo siguiente:

- a) La frecuencia natural más baja debe ser menor que 1 Hz y mayor que 0.25 Hz.
- b) La altura debe ser mayor que 60 metros.
- c) La altura debe ser mayor que 4 veces su ancho mínimo efectivo, donde el ancho efectivo,  $w$ , del edificio debe tomarse como:

$$w = \frac{\sum h_i w_i}{\sum h_i} \quad (2.3)$$

Cuando se trata del diseño de elementos de recubrimiento o elementos estructurales secundarios, se puede utilizar directamente el método estático o pruebas en túnel de viento.

Por otro lado, un edificio es muy sensible a cargas dinámicas si:

- a) La frecuencia natural más baja es menor o igual a 0.25 Hz, o
- b) La altura es mayor que 6 veces su ancho mínimo efectivo, definido por la ecuación 2.3.

### 2.2.1.1 Método Estático

El método estático, establecido en el Código Canadiense, es aplicable para determinar cargas debidas al viento para la mayoría de los edificios de corta y mediana altura, también para el diseño de elementos de recubrimiento de edificios de corta, mediana y gran altura.

Para calcular las presiones o succiones debidos al viento en parte o en toda la superficie de la estructura, se establece la siguiente expresión:

$$p = I_w q C_e C_t C_g C_p \quad (2.4)$$

Donde

- $p$  presión exterior normal a la superficie de la estructura considerada positiva cuando la presión actúa en dirección a la superficie y negativa cuando actúa hacia afuera de la superficie de la misma.
- $I_W$  factor de importancia para cargas de viento, que se basa en el estado límite de servicio y último, SLS y ULS respectivamente (tabla 1).
- $q$  presión de la velocidad de referencia.
- $C_e$  factor de exposición.
- $C_t$  factor de topografía.
- $C_g$  factor de efectos de ráfaga.
- $C_p$  coeficiente de presión exterior.

**Tabla 1 Valores del factor de importancia (NBCC, 2015)**

Importance Category	Importance Factor, $I_w$	
	ULS	SLS
Low	0.8	0.75
Normal	1	0.75
High	1.15	0.75
Post-disaster	1.25	0.75

Para determinar la carga neta de viento en el edificio debe calcularse como la suma algebraica de las cargas en las caras de barlovento y sotavento.

### Factor de exposición, $C_e$

Está en función de la altura de referencia  $h_{ref}$ , la cual, debe cumplir las siguientes condiciones.

$$h_{ref} = \bar{h} \quad \text{si } 6 \text{ m} < h \leq 20 \text{ m} \text{ y } h < b$$

Donde:

- $\bar{h}$  altura media del techo a partir del nivel del suelo, en m.
- $b$  dimensión menor en planta del edificio, en m.

Para otros casos de edificios,  $h$  debe ser:

- La altura real o total medida a partir del nivel de suelo hasta el punto ubicado en la cara de barlovento donde se estén calculando las presiones exteriores.
- La altura media del techo para presiones en las caras paralelas a la dirección del viento.
- La altura media del edificio para presiones en la cara de sotavento.

Para cualquier elemento estructural expuesto a la acción del viento,  $h$  debe ser la altura media medida a partir del nivel de suelo.

Por lo tanto, el factor  $C_e$  se calcula de la siguiente manera:

- $C_e = \left(\frac{h}{10}\right)^{0.2} > 0.9$  para terreno abierto (según la clasificación del Código Canadiense).
- $C_e = 0.7 \left(\frac{h}{12}\right)^{0.3} > 0.7$  para terreno urbano (según la clasificación del Código Canadiense) donde la extensión del terreno urbano viento arriba del edificio debe ser ininterrumpida por al menos 1 km o 20 veces la altura del edificio, la que sea mayor.
- Un valor intermedio entre los casos definidos anteriormente cuando el sitio es menor que 1 km o 20 veces la altura del edificio desde un cambio en las condiciones del terreno, la que sea mayor.

### Factor de efectos de ráfaga, $C_g$

El factor de ráfaga puede adoptar dos valores en función de lo que se requiera diseñar. Estos dos valores son:

- a) 2.0 para el edificio en general y para elementos estructurales principales.
- b) 2.5 para presiones exteriores y succiones en elementos estructurales secundarios.

### Factor de topografía, $C_t$

$$C_t = 1.0 \quad \text{si} \quad \frac{H_h}{2L_h} \leq 0.1 \tag{2.5}$$

$$C_t = \left(1 + \frac{\Delta S}{C_g}\right) (1 + \Delta S) \quad \text{si} \quad \frac{H_h}{2L_h} > 0.1$$

Donde:

$$\Delta S = \Delta S_{max} \left(1 - \frac{|x|}{kL_h}\right) \exp\left(-\frac{\alpha z}{L_h}\right) \tag{2.6}$$

$\Delta S_{max}$  aceleración máxima del viento en la parte alta de una colina o talud que se basa en la simetría y característica dimensional de la forma de la colina donde se requiera evaluar la velocidad del viento (tabla 2).

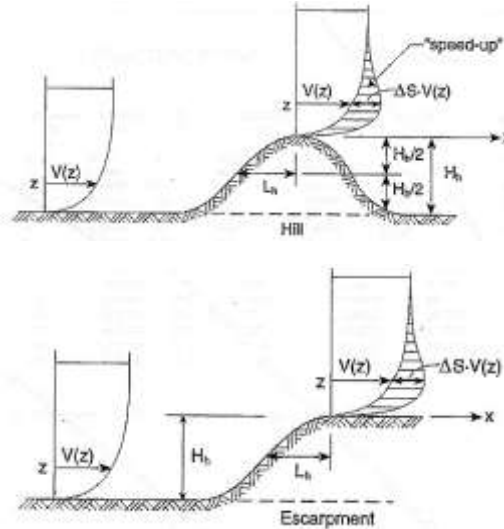
$H_h$  altura de la colina o talud, en m.

$L_h$  distancia horizontal viento arriba medido desde la parte alta de la colina hasta el punto donde la superficie del suelo corresponde a la mitad de la altura de la colina o acantilado, o  $2H_h$ , la que sea mayor (figura 12).

$x$  distancia horizontal medida desde la parte alta de la colina o talud.



- $z$  altura por encima del suelo, en m.
- $\alpha$  constante basada en la forma de la colina o talud (tabla 2).



**Figura 12 Aceleración de la velocidad media del viento en una colina (superior) y un talud (inferior) (NBCC, 2015) Nota figura 12:  $V(z)$  velocidad del viento a una altura  $z$**

**Tabla 2 Valores de  $\Delta S_{max}$  y  $\alpha$  (NBCC, 2015)**

Shape of Hill or Escarpment	$\Delta S_{max}$	$\alpha$	k	
			$x < 0$	$x \geq 0$
2-dimensional hill	$2.2 H_h/L_h$	3	1.5	1.5
2-dimensional escarpment	$1.3 H_h/L_h$	2.5	1.5	4
3-dimensional axi-symmetrical hill	$2.2 H_h/L_h$	4	1.5	1.5

### Coficiente de presión (exterior), $C_p$

Para el diseño del sistema estructural principal, el valor de  $C_p$  se establece como:

- Barlovento.

$$\begin{aligned}
 C_p &= 0.6 & \text{si} & \frac{H}{D} < 0.25 \\
 C_p &= 0.27 \left( \frac{H}{D} + 2 \right) & \text{si} & 0.25 \leq \frac{H}{D} < 1.0 \\
 C_p &= 0.8 & \text{si} & \frac{H}{D} \geq 1.0
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

- Sotavento.

$$C_p = -0.3 \quad \text{si} \quad \frac{H}{D} < 0.25$$

$$C_p = -0.27 \left( \frac{H}{D} + 0.88 \right) \quad \text{si} \quad 0.25 \leq \frac{H}{D} < 1.0 \quad (2.8)$$

$$C_p = -0.5 \quad \text{si} \quad \frac{H}{D} \geq 1.0$$

- Muros laterales.

$$C_p = -0.7 \quad (2.9)$$

- Azoteas.

$$C_p = 1.0 \quad \text{si} \quad \frac{H}{D} \geq 1.0$$

$$C_p = -1.0 \quad \text{si} \quad \frac{H}{D} < 1.0 \text{ para } x \leq H \quad (2.10)$$

$$C_p = -0.5 \quad \text{si} \quad \frac{H}{D} < 1.0 \text{ para } x > H$$

- Elementos secundarios y recubrimientos.

- a) Muros

$$C_p = \pm 0.9 \quad (2.11)$$

- b) Azoteas

$$C_p = -1.0 \quad (2.12)$$

Es necesario consultar las condiciones establecidas en los enunciados correspondientes al coeficiente de presión exterior en el Código Canadiense (NBCC, 2015) para conocer los distintos valores que adopta el mismo, para distintas características de muros y azoteas.

### 2.2.1.2 Método Dinámico

Para la aplicación del método dinámico, las presiones o succiones se calculan de igual manera como se especifica en el método estático, con la diferencia de que el factor de exposición,  $C_e$ , y el factor de efectos de ráfaga,  $C_g$ , deben calcularse según se especifica en los siguientes párrafos.

#### Factor de exposición, $C_e$ (para efectos dinámicos)

- Para edificios en terreno abierto.

$$C_e = \left( \frac{h}{10} \right)^{0.28} \quad \text{pero} \quad 1.0 \leq C_e \leq 2.5 \quad (2.13)$$

- Para edificios en terreno con rugosidad.

$$C_e = 0.5 \left( \frac{h}{12.7} \right)^{0.50} \quad \text{pero} \quad 0.5 \leq C_e \leq 2.5 \quad (2.14)$$

### Factor de efectos de ráfaga, $C_g$ (para efectos dinámicos)

Este factor toma en cuenta los incrementos de las cargas medias del viento debidos a los siguientes factores:

- Ráfagas de viento aleatorias de corta duración sobre el edificio completo o parte del mismo.
- Presiones fluctuantes inducidos en la estela de un edificio, incluyendo los desprendimientos de las fuerzas de vórtices.
- Fuerzas fluctuantes inducidas por el movimiento del edificio.

Todas las estructuras son afectadas en un cierto grado por sus respuestas dinámicas, por lo tanto, las que son afectadas en un grado mayor por dicha respuesta, el factor de efectos de ráfaga,  $C_g$ , para el sistema estructural principal, se debe calcular como se especifica a continuación:

$$C_g = 1 + g_p \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.15)$$

Donde:

$$g_p = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (2.16)$$

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}} \left( B + \frac{SF}{\beta} \right)} \quad (2.17)$$

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{914/H} \left[ \frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right] \left[ \frac{1}{1 + \frac{xw}{122}} \right] \left[ \frac{x}{(1 + x^2)^{\frac{4}{3}}} \right] dx \quad (2.18)$$

$$S = \frac{\pi}{3} \left[ \frac{1}{1 + \frac{8f_n H}{3V_H}} \right] \left[ \frac{1}{1 + \frac{10f_n w}{V_H}} \right] \quad (2.19)$$

$$F = \frac{x_o^2}{(1 + x_o^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (2.20)$$

$$x_o = \frac{1220f_n}{V_H} \quad (2.21)$$

$$V_H = \bar{V} \sqrt{C_{eH}} \quad (2.22)$$

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{2 I_w q}{\rho} C_{eH}} \quad (2.23)$$

Donde:

- $B$  factor de turbulencia de fondo que se puede obtener con la Figura 13.
- $C_{eH}$  factor de exposición evaluado a una altura de referencia  $H$ , adimensional.
- $F$  relación de energía de ráfaga.
- $f_n$  frecuencia natural más baja de la estructura, en Hz.
- $g_p$  factor pico de respuesta máxima.
- $I_w$  factor de importancia.
- $K$  factor correctivo por exposición igual a 0.08 para terreno abierto y 0.10 para terreno con rugosidades, adimensional.
- $q$  presión de referencia.
- $S$  factor de reducción de tamaño.
- $T$  tiempo igual a 3600 segundos.
- $\bar{V}$  velocidad de referencia del viento a una altura de 10 m, en m/s.
- $V_H$  velocidad media del viento en la parte alta de la estructura, en m/s.
- $\beta$  relación de amortiguamiento, el cual debe ser determinado con un método racional, o igual a 0.01, 0.02 y 0.015 para estructuras de acero, concreto y compuestas, respectivamente.
- $\rho$  densidad del aire.

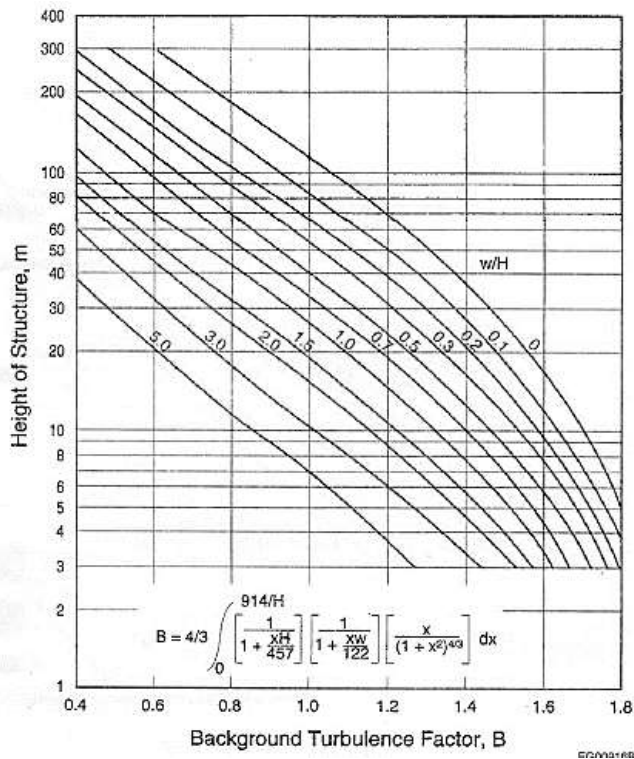


Figura 13 Curvas para obtener el factor de turbulencia de fondo,  $B$ , de manera gráfica (NBCC, 2015)

### 2.2.1.3 Pruebas en Túnel de Viento

Para el caso particular del Código Canadiense, las pruebas en túnel de viento deben ser llevadas a cabo según lo estipulado en la norma ASCE/SEI 49, que lleva por título “Pruebas en túnel de viento para construcciones y otras estructuras”.

Cuando una estructura adyacente a la de interés provoca un efecto de barrera, las cargas debidas al viento para el sistema estructural principal no deben ser menor que el 80% de las cargas determinadas en las pruebas que se mencionaron en el párrafo anterior con el efecto de barrera removido como si se aplicara a:

- a) La fuerza de cortante basal para edificios con relación altura con ancho mínimo efectivo menor o igual a 1.0.
- b) El momento en la base para edificios con relación altura con ancho mínimo efectivo mayor a 1.0.

Cuando se requiere diseñar el recubrimiento y elementos estructurales secundarios, las cargas de viento exteriores determinadas en las pruebas en túnel de viento no deben ser mucho menores que aquellas obtenidas de manera analítica, asumiendo lo siguiente:

- a)  $C_p = \pm 0.72$  y  $C_g = 2.5$  donde la altura de los edificios son mayores que 20 m o mayores que su ancho mínimo efectivo, y

- b)  $C_p C_g = 80\%$  de los valores para zonas  $w$  y  $r$  establecidas en el Artículo 4.1.7.6. del Código Canadiense, en donde la altura de los edificios sea menor o igual a 20 m y no mayor que su ancho mínimo efectivo.

### 2.2.2 Eurocode 1: Actions on Structures – Wind Actions

El Eurocódigo surgió aproximadamente en el año de 1975 bajo la iniciativa de la Comunidad Europea, la cual decidió establecer un programa de acción en el campo de la construcción. El objetivo de dicho programa, al igual que la mayoría de los códigos internacionales, era eliminar ciertos obstáculos técnicos y lograr la homogeneización de especificaciones técnicas.

Durante 15 años, la Comisión, con la ayuda de un Comité Directivo con Miembros Estatales Representativos, llevaron a cabo el desarrollo del programa de los Eurocódigos, el cual condujo a la primera generación de los códigos europeos en la década de los ochentas.

El programa del Eurocódigo Estructural comprende los siguientes estándares:

- **Eurocódigo:** Bases del Diseño Estructural
- **Eurocódigo 1:** Acciones sobre las Estructuras
- **Eurocódigo 2:** Diseño de Estructuras de Concreto
- **Eurocódigo 3:** Diseño de Estructuras de Acero
- **Eurocódigo 4:** Diseño de Estructuras compuestas de acero y concreto
- **Eurocódigo 5:** Diseño de Estructuras de Madera
- **Eurocódigo 6:** Diseño de Estructuras de Mampostería
- **Eurocódigo 7:** Diseño Geotécnico
- **Eurocódigo 8:** Diseño de Estructuras Resistentes al Sismo
- **Eurocódigo 9:** Diseño de Estructuras de Aluminio

Estos estándares del Eurocódigo, en el país de origen, reconocen la responsabilidad de las autoridades regulatorias en cada Miembro Estatal y han salvaguardado su derecho para determinar valores relacionados con la seguridad que son de importancia a nivel nacional, donde estos varían de Estado a Estado.

#### Eurocódigo 1: Acciones sobre las Estructuras - Acciones de Viento

Esta parte del Eurocódigo es aplicable a los siguientes casos:

- Edificaciones y trabajos de Ingeniería Civil con alturas de hasta 200 m.
- Puentes sin claros mayores a 200 m, de tal manera que satisfaga el criterio para la respuesta dinámica.

Ciertos aspectos necesarios para determinar las acciones debidas al viento sobre una estructura son dependientes del entorno, de la disponibilidad y calidad de la información meteorológica, tipo de terreno, etc.

Así como en el Código Canadiense, el *Eurocódigo 1* establece un conjunto de expresiones que permiten calcular los parámetros para el diseño por viento.

### Valores básicos

La velocidad básica del viento, tal como lo define el *Eurocódigo*, es la velocidad media con lapso de promediación de 10 min, independientemente de la dirección y época del año, a una altura de 10 m por encima del suelo en terreno abierto con poca vegetación tal como pasto y obstáculos aislados con separación de al menos 20 alturas de los mismos.

### Velocidad básica del viento

La velocidad básica del viento se debe calcular con la siguiente expresión:

$$V_b = C_{dir} C_{season} V_{b,0} \quad (2.24)$$

Donde:

$C_{dir}$  factor direccional, adimensional.

$C_{season}$  factor de temporada, adimensional.

$V_b$  velocidad básica del viento, en función de la dirección del viento y época del año a 10 m del nivel del terreno categoría 2.

$V_{b,0}$  valor fundamental de la velocidad básica del viento.

Como información complementaria con respecto al cálculo de la velocidad básica y los valores de los factores que no estén contemplados para ciertas características del entorno y/o altitud, el Eurocódigo anexa notas que remiten a sus respectivos apéndices.

El Eurocódigo también toma en cuenta la importancia de la variación de la velocidad del viento con la altura y lo hace con una expresión que está en función de la rugosidad del terreno y de la orografía del mismo, dicha expresión se compone por dos factores afectando a la velocidad básica del viento que se mencionó anteriormente y que se estructura de la siguiente manera:

$$V_m(z) = c_r(z) c_o(z) V_b \quad (2.25)$$

Donde:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{si} & \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{min}) & \text{si} & \quad z \leq z_{min} \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$k_r = 0.19 \left( \frac{z_0}{z_{0,11}} \right)^{0.07} \quad (2.27)$$

$c_o(z)$  factor de topografía considerado como la unidad, excepto en los casos donde los montes, valles, etc., incrementen la velocidad del viento más del 5%.

$c_r(z)$  factor de rugosidad.

$k_r$  factor del terreno en función de la longitud de la rugosidad  $z_0$ .

$z_0$  longitud de la rugosidad.

$z_{0,II} = 0.05 \text{ m}$  para categoría del terreno II.

$z_{max} = 200 \text{ m}$

$z_{min}, z_0$  depende de la categoría del terreno. Se muestran valores recomendados en la Tabla 3.

**Tabla 3 Valores de  $z_0$  y  $z_{min}$  (Eurocode 1, 2005)**

Terrain category		$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
<b>0</b>	Sea or coastal area exposed to the open sea	0.003	1
<b>I</b>	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0.01	1
<b>II</b>	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0.05	2
<b>III</b>	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0.3	5
<b>IV</b>	Area in which at least 15% of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1	10

### Efecto de las estructuras colindantes

Si la estructura será localizada cerca de otra y es el doble de alto que la altura media de las estructuras colindantes, entonces podría ser expuesta a velocidades incrementadas para ciertas direcciones del viento. Algunos casos donde deben ser tomados en cuenta, se encuentran definidos en el Anexo A4 del Eurocódigo.

Asimismo, el efecto de las construcciones cercanas pero distantes unas de otras y otros obstáculos deben ser tomados en cuenta según lo especificado en el Eurocódigo (Anexo A5).

### Turbulencia del viento

Para considerar el efecto de la turbulencia del viento, el Eurocódigo establece un conjunto de expresiones que permiten modificar las presiones debidas al viento para tener en cuenta dicho efecto.



La intensidad de turbulencia con la altura,  $z$ , se define como la desviación estándar de la turbulencia dividida por la velocidad media del viento. La componente turbulenta del viento tiene un valor medio de cero y desviación estándar  $\sigma_v$ , la cual se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_v = k_r V_b k_l \quad (2.28)$$

Donde:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m(z)} = \frac{k_l}{c_0(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min} \quad (2.29)$$

$c_0$  factor de topografía descrito anteriormente.

$I_v(z)$  intensidad de turbulencia.

$k_l$  factor de turbulencia. El valor que recomienda el Eurocódigo para el factor de turbulencia es 1, pero se define de manera más precisa en el Anexo Nacional del Eurocódigo.

$k_r$  factor del terreno definido anteriormente.

$V_b$  velocidad básica del viento definido anteriormente.

$z_0$  longitud de rugosidad.

### Presión pico de la velocidad

La presión pico de la velocidad, a la altura  $z$ , la cual contempla las fluctuaciones de la velocidad media y las ráfagas, se calcula de la siguiente manera:

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \frac{1}{2} \rho V_m^2(z) = c_e(z) q_b \quad (2.30)$$

Donde:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (2.31)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad (2.32)$$

$c_e(z)$  factor de exposición.

$q_b$  presión básica del viento.

$\rho$  densidad del aire, la cual está en función de la altitud, temperatura y la presión barométrica que se espera en la región. El valor que recomienda el Eurocódigo es de 1.25 kg/m<sup>3</sup>.

### Presiones debidas al viento

La presión sobre las estructuras en las superficies externas,  $w_e$ , se calcula como sigue:

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe} \quad (2.33)$$

Donde:

$c_{pe}$  coeficiente de presión externa.

$q_p(z_e)$  presión pico de la velocidad.

$z_e$  altura de referencia.

La presión interna que actúa en las superficies internas de la estructura,  $w_i$ , se calcula de la siguiente manera:

$$w_i = q_p(z_i) c_{pi} \quad (2.34)$$

Donde:

$c_{pi}$  coeficiente de presión interna.

$q_p(z_i)$  presión pico de la velocidad.

$z_i$  altura de referencia.

La presión neta sobre muros, techo o en algún elemento de la estructura es la diferencia entre las presiones sobre las superficies opuestas tomando en cuenta sus respectivos signos. Las presiones dirigidas hacia la superficie son consideradas positivas y las que actúan de la superficie hacia afuera son consideradas negativas (figura 14).

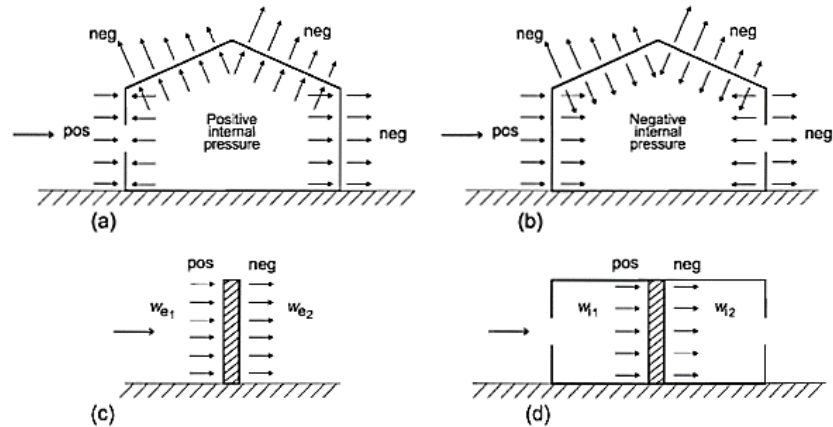


Figura 14 Diagramas de presión identificando su signo, neg (-) y pos (+) (Eurocode 1, 2005)

### Coefficientes de presión

Los coeficientes de presión externa,  $c_{pe}$ , para construcciones o parte de ellas dependen del área donde el viento actuará. El Eurocódigo proporciona diagramas de ayuda para seleccionar el coeficiente de presión indicado para muros y techos, dependiendo de la forma que adopte. Dichos diagramas son para estructuras simétricas rectangulares en planta con techos planos, con pendiente, a dos y cuatro aguas, cilíndricos, en forma de sierra, etc.

### Factor estructural

El factor estructural  $c_s c_d$  toma en cuenta el efecto de las acciones debidas al viento desde la no simultanea frecuencia de las presiones del viento pico sobre una superficie ( $c_s$ ) junto con el efecto de las vibraciones que provoca la turbulencia a una estructura ( $c_d$ ). Es resultado de agrupar dos factores, el factor de tamaño  $c_s$  y el factor dinámico  $c_d$ .

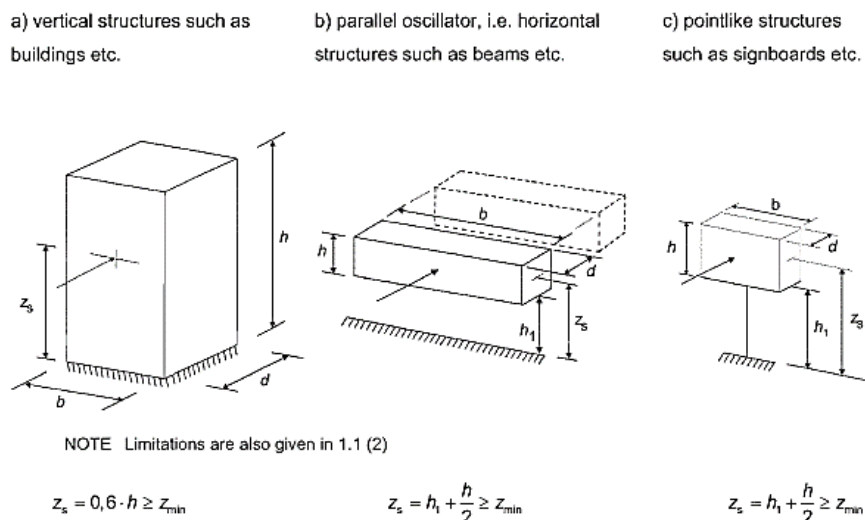
Se tomará el valor del factor estructural como la unidad cuando:

- La altura de los edificios sea menor que 15 m.
- En elementos de techumbre o fachadas que tengan frecuencia natural mayores que 5 Hz.
- Edificios a base de marcos que tengan muros estructurales y los cuales sean menores a 100 m de alto y cuya altura sea menor que 4 veces la profundidad en la que el viento se infiltrará.
- Las chimeneas con sección circular cuya altura sea menor que 60 m y 6.5 veces su diámetro.

Por el contrario, el cálculo del factor estructural se tomará en cuenta cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- La estructura corresponde a alguna de las formas geométricas generales (figura 15).
- Solo cuando la vibración en la dirección del viento y en el modo fundamental es significativa, y la forma del modo tiene un signo constante.

La contribución de la vibración en la dirección del viento a la respuesta desde el segundo u otro modo mayor, es despreciable.



**Figura 15 Formas generales de estructuras. Las dimensiones y altura de referencia también son mostradas. a) estructuras verticales, b) elementos estructurales y c) anuncios (Eurocode 1, 2005)**

Por lo tanto, el cálculo del factor estructural solo puede realizarse si se cumplen las condiciones antes descritas, con la siguiente expresión:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 I_v(z_s)} \quad (2.35)$$

La escala de longitud de turbulencia,  $L(z)$ , representa el tamaño promedio de ráfaga para vientos naturales. Para alturas,  $z$ , debajo de los 200 m la longitud de escala de turbulencia se calcula de la siguiente manera:

$$L(z) = L_t \left( \frac{z}{z_t} \right)^\alpha \quad \text{para} \quad z \geq z_{min} \quad (2.36)$$

$$L(z) = L(z_{min}) \quad \text{para} \quad z < z_{min}$$

$$\alpha = 0.67 + 0.05 \ln(z_0) \quad (2.37)$$

Donde:

$$L_t = 300 \text{ m.}$$

$$z_t = 200 \text{ m.}$$

$z_0$  está dado en metros (tabla 3).

$z_{min}$  se presenta en la Tabla 3.

La distribución del viento sobre las frecuencias es expresado por la función de la densidad de potencia espectral adimensional,  $S_L(z, n)$ , mediante la siguiente expresión:

$$S_L(z, n) = \frac{n S_v(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6.8 f_L(z, n)}{(1 + 10.2 f_L(z, n))^{\frac{5}{3}}} \quad (2.38)$$

Donde:

$$f_L(z, n) = \frac{n L(z)}{V_m(z)} \quad (2.39)$$

$L(z)$  longitud de escala de turbulencia.

$n$  frecuencia natural de la estructura, en Hz.

$V_m(z)$  velocidad media del viento.

El factor de fondo,  $B^2$ , teniendo en cuenta la falta de una completa correlación de la presión actuando sobre la superficie de la estructura, se calcula de la siguiente manera:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0.63}} \quad (2.40)$$

Donde:

$b, h$  es el ancho y altura de la estructura.

$L(z_s)$  es la longitud de escala de turbulencia a una altura de referencia  $z_s$ .

El factor pico de respuesta máxima,  $k_p$ , se define como la relación del valor máximo de la parte fluctuante de la respuesta con su desviación estándar y se determina con la siguiente expresión:

$$k_p = \sqrt{2 \ln(v T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(v T)}} \quad (2.41)$$

Dicho factor puede asumirse con el valor de 3 o con la ecuación 2.41, cualquiera que sea mayor.

Donde:

$$v = n \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} ; v \geq 0.08 \text{ Hz} \quad (2.42)$$

- $T$  tiempo de promediación de la velocidad media del viento,  $T = 600$  segundos.
- $\nu$  frecuencia de cruces. El valor de 0.08 Hz corresponde a un valor del factor pico,  $k_p$ , de 3.0.

El factor de respuesta resonante,  $R^2$ , considerando la turbulencia en resonancia con el modo de vibración de la estructura considerado en el diseño, se calcula de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \delta} S_L(z_s, n_{1,x}) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b) \quad (2.43)$$

Donde:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \eta_h^2} (1 - e^{-2 \eta_h}) \text{ cuando } \eta_h = 0 \text{ entonces } R_h = 1 \quad (2.44)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \eta_b^2} (1 - e^{-2 \eta_b}) \text{ cuando } \eta_b = 0 \text{ entonces } R_b = 1 \quad (2.45)$$

$$\eta_h = \frac{4.6 h}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (2.46)$$

$$\eta_b = \frac{4.6 b}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (2.47)$$

$R_h, R_b$  funciones de admitancia aerodinámica.

$S_L$  función de densidad de potencia espectral.

$\delta_a$  decremento logarítmico total del amortiguamiento.

### 2.3 Normativa de viento en la Ciudad de México

En la Ciudad de México existen dos caminos para diseñar edificios sometidos a la acción del viento, la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento 2017 (NTCDV, 2017) y el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento 2008 (MDOCDV, 2008), ambos con el mismo grado de validez, aunque el segundo es un manual.

Con lo que respecta a las NTCDV, en diciembre del 2017 se publicaron las modificaciones a las mismas, las cuales desde el año 2012 aproximadamente comenzaron con el proceso de actualización. En el caso del MDOCDV, posterior a la versión del 2008, se llevarán a cabo modificaciones que permitirán obtener una versión más actualizada del manual.

El capítulo siguiente tratará de la NTCDV 2004 para conocer su metodología y posteriormente realizar la comparación con las recién publicadas en el mes de diciembre del año 2017. Además, en el presente trabajo, se utilizará el MDOCDV 2008 como un punto adicional de comparación.

### 2.3.1 Norma Técnica Complementaria para Diseño por Viento 2004 (NTCDV)

La NTCDV 2004 incluye una metodología simplificada del Código Canadiense, ajustada a las condiciones de la Ciudad de México. Muchas de las expresiones contenidas en la norma presentan una gran similitud con las contenidas en el Código Canadiense.

Al igual que en el Código Canadiense, la NTCDV presenta la clasificación de las estructuras según los efectos que el viento ocasione en ellas, clasificación del terreno, características de la rugosidad del mismo y dos métodos de cálculo: método estático y método dinámico. En el caso del método para diseño en túnel de viento contenido en el Código Canadiense, la NTCDV no enfatiza en dicho método por las características geométricas de los edificios predominantes en la Ciudad de México (simétricos y rectangulares de altura moderada).

Para diseñar un edificio que será sometido a la acción del viento con el uso de la NTCDV 2004, se debe clasificar a la estructura según su tipo de uso. La clasificación de las estructuras se encuentra dividida en 4 tipos, mismos que contemplan la sensibilidad ante la acción del viento, los cuales son:

- *Tipo 1.* Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos de viento. Se consideran las estructuras cerradas con sistema de cubierta rígidos que sean capaz de resistir cargas debidas al viento sin que varié su geometría.
- *Tipo 2.* Estructuras sensibles a las ráfagas de corta duración y cuyos periodos naturales largos favorecen la frecuencia de oscilaciones importantes. Se consideran los edificios cuya relación de esbeltez es mayor que 5 o con periodo fundamental mayor que 1 segundo.
- *Tipo 3.* Estructuras similares a las del tipo 2 en que, además, la forma de la sección transversal propicia la generación periódica de vórtices o remolinos cuyos ejes sean paralelos a la dimensión mayor de la estructura.
- *Tipo 4.* Estructuras que, debido a su forma o largo de sus periodos de vibración, presentan problemas aerodinámicos especiales.

Como dato adicional, se presenta una tabla (tabla 4) con algunos ejemplos de estructuras pertenecientes a cada Tipo de estructura junto con sus efectos a considerar.

**Tabla 4 Ejemplos de estructuras y sus correspondientes efectos del viento a considerar**

<b>Tipo</b>	<b>Ejemplos</b>	<b>Efectos a considerar</b>
1	Edificios con sección rectangular principalmente y sistema de cubierta rígido	Efectos estáticos del viento
2	Torres atirantadas o en voladizo para líneas de transmisión, antenas, tanques elevados, parapetos, anuncios, etc.	Efectos estáticos y dinámicos causados por la turbulencia. Se puede diseñar con un método estático equivalente
3	Edificios con sección circular principalmente, tuberías, chimeneas, etc.	Efectos estáticos y dinámicos causados por la turbulencia. Además se revisará la capacidad para resistir efectos dinámicos de vórtices alternantes
4	Cubiertas colgantes, etc.	Los efectos de viento se evaluarán con un análisis que tome en cuenta las características de la turbulencia y sus efectos dinámicos

### **Estudio en túnel de viento**

A pesar de que la NTCDV no establece un procedimiento para realizar pruebas en túnel de viento como lo presenta el Código Canadiense, si asumen el hecho de que es necesario realizar pruebas en túnel de viento para edificios con geometría poco inusual y con características que las hagan particularmente sensibles a los efectos del viento. Además, permite el uso de resultados existentes de ensayos realizados en modelos con características semejantes; en todos los casos para la interpretación de resultados seguirán técnicas reconocidas, y a su vez, aprobados por la Administración.

### **Método simplificado y estático para diseño por viento**

Este método debe ser utilizado para determinar las presiones debidas al viento en estructuras que no tengan más de 15 metros de altura y que su forma esté compuesta principalmente por una combinación de rectángulos con planta regular y/o simétrica, de tal manera que la relación de esbeltez de la estructura sea menor que 4.

### **Velocidad de diseño**

El primer aspecto a considerar es la velocidad de diseño, la cual consta de un ajuste de la velocidad regional que está en función del periodo de retorno y del tiempo de promediación principalmente. La velocidad regional es la velocidad máxima del viento a una altura de 10 metros sobre el lugar donde será desplantada la estructura para condiciones del terreno plano con obstáculos aislados. La NTCDV agrupa un conjunto de valores de velocidades regionales en dos zonas, las cuales contienen a las delegaciones de la Ciudad de México donde la velocidad es aproximadamente la misma, comprendido de otro modo, se generaliza el valor de la velocidad regional (tabla 5).



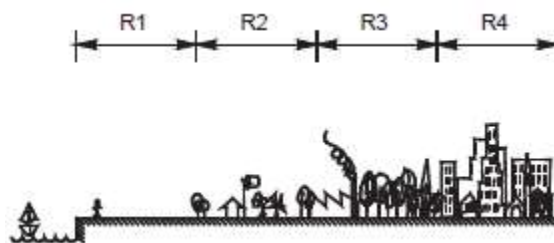
**Tabla 5 Velocidades regionales según la importancia de la construcción y la zonificación (NTCDV , 2004)**

Periodo de retorno, años	Importancia de la construcción		
	A	B	Temporal
200	50	10	
Zona I: Delegaciones de Alvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, G.A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza	39	36	31
Zona II: Delegaciones de Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco	35	32	28

Otro aspecto, que es importante en la determinación de la velocidad de diseño es el tipo o rugosidad de terreno, donde las NTCDV lo clasifican en 4 tipos y que se definen a continuación:

- R1. Escasas o nulas construcciones al flujo de viento, como en campo abierto.
- R2. Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.
- R3. Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del tipo R4.
- R4. Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m.

La NTCDV presenta un diagrama con cada rugosidad del terreno (figura 16).



**Figura 16 Rugosidad del terreno (NTCDV , 2004)**

La velocidad de diseño también se ve afectada por un factor que toma en cuenta su variación con la altura, para ello es importante la selección de la rugosidad del terreno ya que, con base en dicha selección, el factor de variación con la altura podrá ser calculado debido a que a cada rugosidad del terreno le corresponde dos constantes,  $\alpha$  y  $\delta$ , que caracterizan al flujo del viento (tabla 6).

**Tabla 6 Rugosidad del terreno,  $\alpha$  y  $\delta$  (NTCDV , 2004)**

Tipos de terreno		$\alpha$	$\delta$ , m
R1	Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto	0.099	245
R2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	0.128	315
R3	Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del Tipo R4	0.156	390
R4	Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las	0.170	455

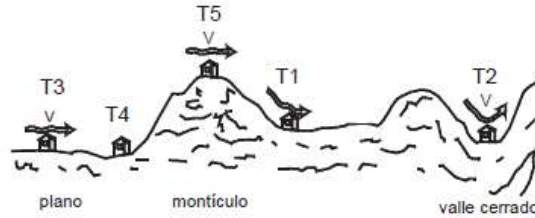
Por último, la NTCDV establece un factor basado en la topografía y en la rugosidad. La topografía del terreno está dividida en cinco tipos:

- T1. Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento.
- T2. Valles cerrados.
- T3. Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5% (normal).
- T4. Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10%.
- T5. Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10%, cañadas o valles cerrados.

A cada tipo de rugosidad del terreno, le corresponde un tipo de topografía o forma topográfica (figura 17), por lo tanto, dependiendo de las características del terreno (rugosidad y topografía) se obtendrá un factor que tomará en cuenta dichas características (tabla 7).

**Tabla 7 Factor de topografía y rugosidad del terreno (NTCDV , 2004)**

Tipos de topografía	Rugosidad de terrenos en alrededores		
	Terreno tipo R2	Terreno tipo R3	Terreno tipo R4
T1 Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.80	0.70	0.66
T2 Valles cerrados	0.90	0.79	0.74
T3 Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5 % (normal)	1.00	0.88	0.82
T4 Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %	1.10	0.97	0.90
T5 Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10 %, cañadas o valles cerrados	1.20	1.06	0.98



**Figura 17 Formas topográficas locales (NTCDV , 2004)**

Entonces, la expresión para determinar la velocidad de diseño es la siguiente:

$$V_D = F_{TR} F_\alpha V_R \quad (2.48)$$

Donde:

$$F_\alpha = 1.0 \quad \text{si } z \leq 10 \text{ m}$$

$$F_\alpha = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad \text{si } 10 \text{ m} < z < \delta \quad (2.49)$$

$$F_\alpha = \left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha \quad \text{si } z \geq \delta$$

- $F_\alpha$  factor que toma en cuenta la variación de la velocidad con la altura.
- $F_{TR}$  factor correctivo que toma en cuenta las condiciones locales relativas a la topografía y a la rugosidad del terreno en los alrededores del sitio de desplante (tabla 7).
- $V_R$  velocidad regional según la zona que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura (tabla 5).
- $z$  altura medida desde el suelo, en m.
- $\alpha$  exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura (tabla 6).
- $\delta$  altura gradiente, en m (tabla 6).

### Presión de diseño

Para determinar la presión que ejerce el flujo del viento sobre una estructura, es necesario considerar la forma de la misma, para ello, la NTCDV establece coeficientes de presión para las distintas zonas de la estructura (barlovento, sotavento, muros laterales y techos).

La expresión general para determinar la presión de diseño es la siguiente:

$$p_z = 0.048 C_p V_D^2 \quad (2.50)$$

Donde:

$C_p$  coeficiente local de presión, que depende de la forma de la estructura (tabla 8), adimensional.

$V_D$  velocidad de diseño a la altura  $z$ , en m/s.

La expresión anterior contempla la densidad del viento con un lapso de promediación de una hora, de ahí el valor constante de 0.048, que multiplica al coeficiente de presión y al cuadrado de la velocidad de diseño, con unidades de  $\left(\frac{s}{m}\right)^2$  para ajustarse a las unidades de presión, dado que el coeficiente de presión es adimensional, por lo que el resultando queda en  $\frac{kg}{m^2}$ .

**Tabla 8 Valores de coeficientes de presión para estructuras cerradas**

Superficie de aplicación	Cp
Pared de barlovento	0.8
Pared de sotavento	-0.4
Paredes laterales	-0.8
Techos planos	-0.8
Techos inclinados lado sotavento	-0.7
Techos inclinados lado barlovento	$-0.8 < 0.04\theta - 1.6 < 1.8$

Los coeficientes de presión se presentan en una tabla, donde dependiendo la dirección del viento, es el valor del coeficiente. Se considera constante en toda la altura, ancho y profundidad de la estructura, por lo que se determinará un solo valor de presión de diseño para la estructura en cuestión.

El apartado de coeficientes de presión se divide en 5 casos, los cuales son:

- Caso I. Edificios y construcciones cerradas.
- Caso II. Paredes aisladas y anuncios.
- Caso III. Estructuras reticulares.
- Caso IV. Chimeneas, silos y similares.
- Caso V. Antenas y torres con celosías.

Cada caso presenta una metodología para determinar coeficientes de presión y expresiones que se deberán usar para determinar la presión de diseño, según las características de la estructura.

### Diseño de elementos de recubrimiento

Como parte del diseño de una estructura, está el diseño de los elementos de recubrimiento que, aunque no forman parte de la estructura principal y no contribuyen a la resistencia de la misma, se deberán diseñar para evitar que la acción del viento provoque su desprendimiento y provoque daños a personas tanto fuera como dentro de la estructura, para ello se establece una metodología

particular para la determinación de coeficientes de presión, que dependen de las características geométricas de la estructura y del efecto del viento ya sea empuje o succión.

### Empujes dinámicos paralelos al viento

Las construcciones que pertenecen al Tipo 2, definido anteriormente, deberán tomar en cuenta tanto los efectos estáticos como los dinámicos debidos a la turbulencia del viento. Dichos efectos serán tomados en cuenta con la determinación de un factor denominado *factor de amplificación dinámica (FAD)* que multiplicará a la presión de diseño y que se determina con la siguiente expresión:

$$F_{AD} = 0.43 + g \sqrt{\frac{R}{C_e} \left( B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1 \quad (2.51)$$

Donde:

$$g = \frac{1}{2.3} \left( \sqrt{2 \ln(3600 \nu)} + \frac{0.58}{\sqrt{2 \ln(3600 \nu)}} \right) \geq 1.48 \quad (2.52)$$

$$\nu = n_0 \sqrt{\frac{SF}{SF + \beta B}} \quad (2.53)$$

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{\frac{914}{H}} \left( \frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{x b}{122}} \right) \left( \frac{x}{(1 + x^2)^{\frac{4}{3}}} \right) dx \quad (2.54)$$

$$S = \frac{\pi}{3} \left( \frac{1}{1 + \frac{8 n_0 H}{3 V_H}} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{10 n_0 b}{V_H}} \right) \quad (2.55)$$

$$F = \frac{x_0^2}{(1 + x_0^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (2.56)$$

$$C_e = \left( \frac{z}{a} \right)^n \quad (2.57)$$

$$x_0 = \frac{1220 n_0}{V_H} \quad (2.58)$$

$$V_H = V_R \sqrt{R C_e} \quad (2.59)$$

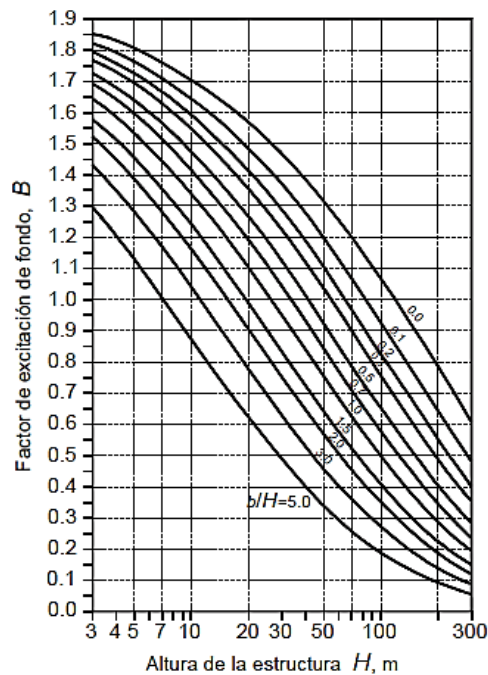
Donde:

$B$  factor de excitación de fondo.

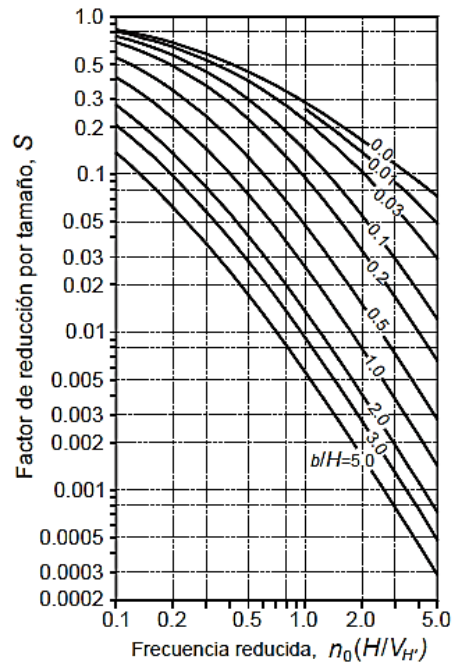
$C_e$  factor correctivo por exposición.

- $F$  relación de energía en ráfaga.
- $F_{AD}$  factor de amplificación dinámica.
- $g$  factor de respuesta máxima.
- $H$  altura de la estructura, en m.
- $n_0$  frecuencia del modo fundamental de la estructura, en Hz.
- $R$  factor de rugosidad.
- $S$  factor reductivo por tamaño.
- $V_H$  velocidad de diseño a la altura  $H$ , en m/s.
- $\beta$  fracción de amortiguamiento crítico, igual a 0.01 en estructuras de acero y 0.02 en estructuras de concreto, adimensional.

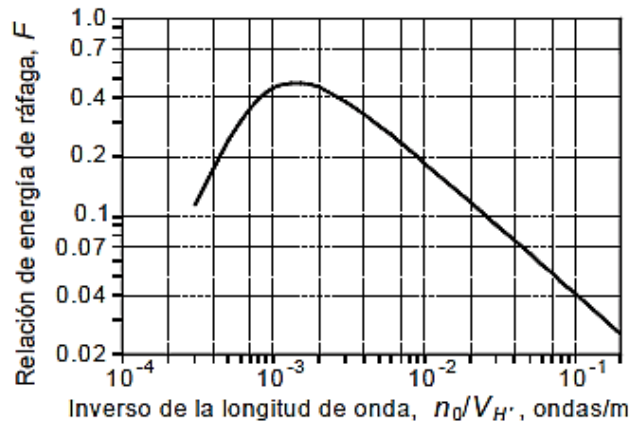
Los factores  $B$ ,  $F$  y  $S$  pueden ser determinados de manera gráfica con las Figuras 18, 19 y 20, respectivamente.



**Figura 18** Parámetro  $B$  para calcular el factor de respuesta dinámica (NTCDV , 2004)



**Figura 19** Parámetro  $S$  para calcular el factor de respuesta dinámica (NTCDV , 2004)



**Figura 20** Parámetro  $F$  para calcular el factor de respuesta dinámica (NTCDV , 2004)

Para la determinación de los factores  $V_H$  y  $C_e$ , se requieren los valores de las constantes  $R$ ,  $a$  y  $n$ , los cuales están definidos en la Tabla 9 y que dependen del tipo de rugosidad del terreno donde se desplantará la estructura.

**Tabla 9 Parámetros R, a y n según la condición de exposición (NTCDV , 2004)**

Exposición	R	a	n
R1	0.04	10	0.18
R2	0.08	10	0.28
R3	0.16	20	0.50
R4	0.34	33	0.72

El capítulo 6 de la NTCDV 2004, considera el efecto de vórtices periódicos sobre estructuras prismáticas, el cual solo será contemplado en estructuras del Tipo 3, definido anteriormente. Debido a las características de las estructuras del Tipo 3, la acción del viento sobre las mismas genera vórtices alternantes, los cuales, a su vez, son generados por las fuerzas perpendiculares a la dirección del viento que actúan sobre las estructuras.

La ecuación definida en el capítulo 6, para contemplar el efecto de vórtices alternantes, permite determinar una fuerza por unidad de longitud del eje de la pieza en función de la velocidad crítica del viento para la cual se generan los vórtices. La velocidad crítica que se utilizará, será la que resulte para estructuras cilíndricas.

Por lo tanto, la ecuación que se deberá usar para determinar la fuerza por unidad de longitud es la siguiente:

$$F_L = \frac{C_T}{2\beta} 0.0048 V_{cr}^2 d \quad (2.60)$$

Donde:

$$V_{cr} = 5 n_0 d \quad (2.61)$$

- $C_T$  factor de empuje transversal igual a 0.28 para estructuras de sección circular.
- $d$  dimensión de la estructura paralela a la dirección del viento, en m.
- $F_L$  fuerza por unidad de longitud, en kg/m.
- $V_{cr}$  velocidad critica del viento, en m/s.
- $\beta$  coeficiente de amortiguamiento de la estructura, como porcentaje de amortiguamiento crítico, adimensional.

En el caso de las vibraciones locales y omisión de efectos dinámicos de vorticidad, se establecen algunas recomendaciones y requisitos dentro del capítulo 6 de la NTCDV 2004.



## Desplazamientos permisibles

El último capítulo de la NTCDV 2004 refiere a los desplazamientos permisibles relativos entre niveles consecutivos de edificios causados por las fuerzas de diseño por viento, los cuales no deberán exceder los siguientes valores, mismos que están expresados como fracción de la diferencia entre los niveles de piso:

- a) 0.005: No se deberá exceder este valor siempre y cuando no existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares.
- b) 0.002: No se deberá exceder este valor siempre y cuando existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares.

En todos los casos, en el cálculo de desplazamientos relativos se podrá deducir la componente debida a la flexión general del edificio o la torre que se diseñen. Los efectos de segundo orden podrán despreciarse cuando en todos los entrepisos o segmentos verticales de la estructura se cumpla la siguiente condición:

$$\psi < 0.08 \frac{V}{W} \quad (2.62)$$

Donde:

- $F_V$  fuerza cortante en el entrepiso o segmento en estudio.
- $W$  suma de las cargas viva y muerta por encima de dicho entrepiso o segmento.
- $\psi$  cociente del desplazamiento relativo entre dos niveles de piso o secciones horizontales, dividido entre la correspondiente diferencia de elevaciones.

### 2.3.2 Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento 2008 (MDOCDV)

El Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad para Diseño por Viento 2008 (MOCDV, 2008), presenta una metodología de diseño basada en las especificaciones y expresiones contenidas en el Eurocódigo con una base de datos probabilista de vientos máximos en México con la cual se crearon mapas de isotacas. Está compuesto por cuatro capítulos y cuatro apéndices de recomendaciones de cálculo. El primer capítulo consta del alcance del Manual, clasificación de las estructuras tanto por su importancia como por su respuesta ante la acción del viento, las acciones del viento a considerarse, requisitos y unidades de trabajo. El segundo consta de la determinación de la velocidad básica de diseño, así como de los factores a considerar dependiendo de las características del terreno. El tercero y el cuarto refiere a los dos procedimientos de diseño basado en las características dinámicas de las estructuras, el análisis estático y el análisis dinámico, respectivamente.

Las estructuras especiales como lo son puentes, estructuras marinas alejadas de las costas y torres de transmisión no están contempladas en el manual por lo que, para fines de este trabajo, solo se explicarán los procedimientos de diseño de edificios de forma prismática.

Un principal aspecto a tomar en cuenta es la dirección de análisis, donde la estructura se analizará de manera que pueda actuar por lo menos en dos direcciones horizontales, perpendiculares e independientes entre sí, de dichas se seleccionará la más desfavorable para la estabilidad de la estructura en estudio, tomando en cuenta la rugosidad del terreno considerando obstáculos y construcciones aledañas.

### **Clasificación de las estructuras según su importancia**

Como parte de la clasificación de las estructuras del MDOCDV 2008, se definen tres grupos los cuales se basan en el nivel de seguridad de la construcción: alto, moderado y bajo. Dicho grado de seguridad se estableció tomando en consideración tres aspectos fundamentales ante la ocurrencia de un evento extremo:

- a) Evitar lesiones y pérdidas humanas.
- b) Limitar los daños de tipo económico o cultural.
- c) Lograr que sigan operando en forma continua las estructuras que prestan servicios indispensables.

Resulta difícil evaluar cuantitativamente el nivel aceptable de seguridad debido a la escasa información que existe sobre el costo de las pérdidas debidas a las fallas en distintas construcciones, por lo tanto, la clasificación de las estructuras según su importancia o uso se define en función de dicho nivel valuado cualitativamente.

Los grupos de estructuras debido a su importancia son los siguientes:

- *Grupo A.* Estructuras con un grado de seguridad elevado. Dentro de este grupo se incluyen aquellas cuya falla cause la pérdida de un número importante de vidas o perjuicios económicos; las construcciones y depósitos cuya falla implique un peligro significativo por almacenar o contener sustancias tóxicas inflamables.
- *Grupo B.* Estructuras con un grado de seguridad moderado. Aquí se incluyen aquellas cuya falla ocasionen baja pérdida de vidas humanas y los daños materiales sean de magnitud intermedia; aquellas cuya falla por viento pueda poner en peligro a otras de este grupo o del anterior. Los recubrimientos y elementos estructurales que formen parte de fachadas también están incluidas en este grupo siempre y cuando no ocasionen un daño corporal o material importante.
- *Grupo C.* Estructuras con un grado de seguridad bajo. Son aquellas estructuras que no ocasionan daños con consecuencias graves ni daños a construcciones del grupo A y B debido a su falla.

Ejemplos de estructuras pertenecientes a cada Grupo se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10 Ejemplos de la clasificación de las estructuras según su importancia**

Grupo	Ejemplos
A	Áreas de reunión con capacidad mayor que doscientas personas (salas de espectáculos, auditorios y centros de convenciones), locales y cubiertas que alojen equipo especialmente costoso, muelles, templos, estadios, terminales de distribución de hidrocarburos, centrales telefónicas e inmuebles de telecomunicaciones principales, estaciones terminales de transporte, estaciones de bomberos, de rescate y de policía, hospitales e inmuebles médicos con áreas de urgencias, centros de operación en situaciones de desastre, escuelas, chimeneas, subestaciones eléctricas
B	Plantas industriales, subestaciones eléctricas de menor importancia que las del Grupo A, bodegas ordinarias, gasolineras (excepto los depósitos exteriores de combustibles pertenecientes al Grupo A), comercios, restaurantes, casas para habitación, viviendas, edificios de apartamentos u oficinas, hoteles, bardas cuya altura sea mayor que 2.5 metros, salas de reunión y espectáculos, estructuras de depósitos urbanas o industriales, no incluidas en el Grupo A. Recubrimientos como cancelerías y elementos estructurales que formen parte de las fachadas
C	Estructuras o elementos temporales con vida útil menor que tres meses, bodegas provisionales, cimbas, carteles, muros aislados y bardas con altura menor o igual que 2.5 metros

### **Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento**

Otra clasificación que define el Manual, es la correspondiente a la respuesta de las estructuras ante la acción del viento, misma que se divide en 4 tipos. Para poder diseñar un edificio, primero se debe establecer su clasificación, ya que dependiendo de ello se podrá seleccionar el método para estimar las cargas de diseño debidas al viento. Los distintos tipos de estructuras son los siguientes:

- *Tipo 1.* Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. En este tipo se encuentran las estructuras cuya relación de esbeltez es menor o igual a 5 y con periodo natural de vibración del primer modo menor o igual que un segundo. Se incluyen las construcciones cerradas con sistema de cubierta rígidos.
- *Tipo 2.* Estructuras sensibles a la turbulencia del viento con periodos naturales que favorecen a la ocurrencia de oscilaciones importantes por la acción del viento. Se encuentran en este tipo, las estructuras con relación de esbeltez mayor que 5 o con periodo fundamental mayor que un segundo.
- *Tipo 3.* Estructuras con las características del Tipo 2 y, además, presentan oscilaciones importantes transversales al flujo del viento al aparecer vórtices o remolinos periódicos que interactúan con la estructura.
- *Tipo 4.* Estructuras que presentan problemas aerodinámicos inestables debido a su forma y dimensiones o por periodos de vibración mayores que un segundo.

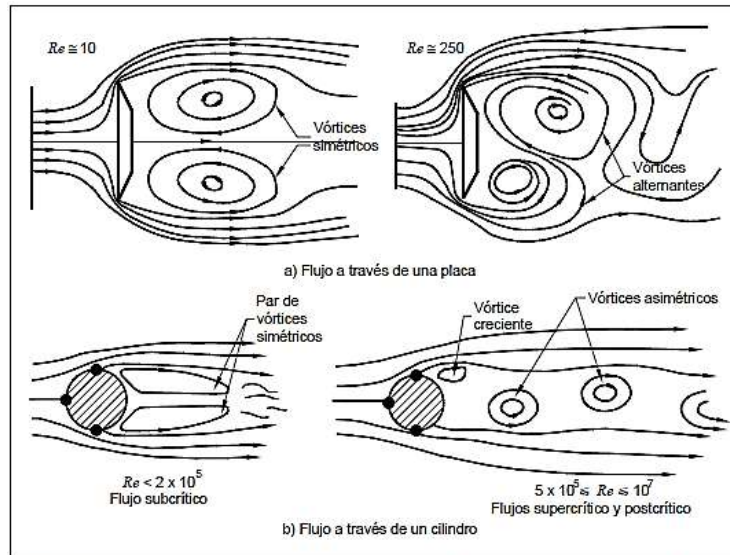
Un fenómeno importante que puede producir vibraciones peligrosas en construcciones flexibles es el denominado “aleteo”. Este fenómeno es común en cubiertas colgantes con curvatura pequeña

y en puentes colgantes, ya que cuando el viento incide con un ángulo de ataque muy bajo sobre áreas planas grandes o de muy baja curvatura, puede excitar simultáneamente vibraciones de flexión y torsión. Los desplazamientos de un modo de vibración aumentan los efectos del viento sobre algún otro; si estos tienen periodos próximos entre sí, se acoplan, y la amplitud de los desplazamientos aumenta ciclo tras ciclo.

### **Acciones del viento que deben considerarse**

A continuación, se presentan cuatro acciones del viento que deben considerarse en el diseño de estructuras, según el MDOCDV 2008, dichas acciones son las siguientes:

- *Acción I – Empujes medios.* Son causados por presiones y succiones del flujo medio del viento, tanto exteriores como interiores y generan presiones globales y locales, dichos empujes no varían con el tiempo.
- *Acción II – Vibraciones generadas por ráfagas turbulentas en la dirección del viento.* Las generan fuerzas variables, paralelas al flujo medio, causadas por la turbulencia del viento y cuya fluctuación en el tiempo influye en la respuesta estructural.
- *Acción III – Vibraciones transversales al flujo y torsión.* La presencia de estructuras cilíndricas o prismáticas dentro del flujo del viento, genera el desprendimiento de vórtices alternantes que provocan fuerzas y vibraciones transversales a la dirección del flujo (figura 21). Por otro lado, la posible distribución asimétrica de presiones en las estructuras puede ocasionar fuerzas de torsión sobre éstas.
- *Acción IV – Inestabilidad aerodinámica.* Es generada por la amplificación dinámica de la respuesta estructural causada por: la geometría de la construcción, los distintos ángulos de incidencia del viento, las propiedades dinámicas de la estructura y el cambio de amortiguamiento aerodinámico.



Nota: Los números de Reynolds que se muestran son aproximados puesto que dependen de la turbulencia del flujo.

**Figura 21 Aparición de vórtices alternantes (MDOCDV, 2008)**

A cada Tipo de estructura le corresponde un efecto de la acción del viento que deberá ser considerado (tabla 11).

**Tabla 11 Ejemplos de la clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento**

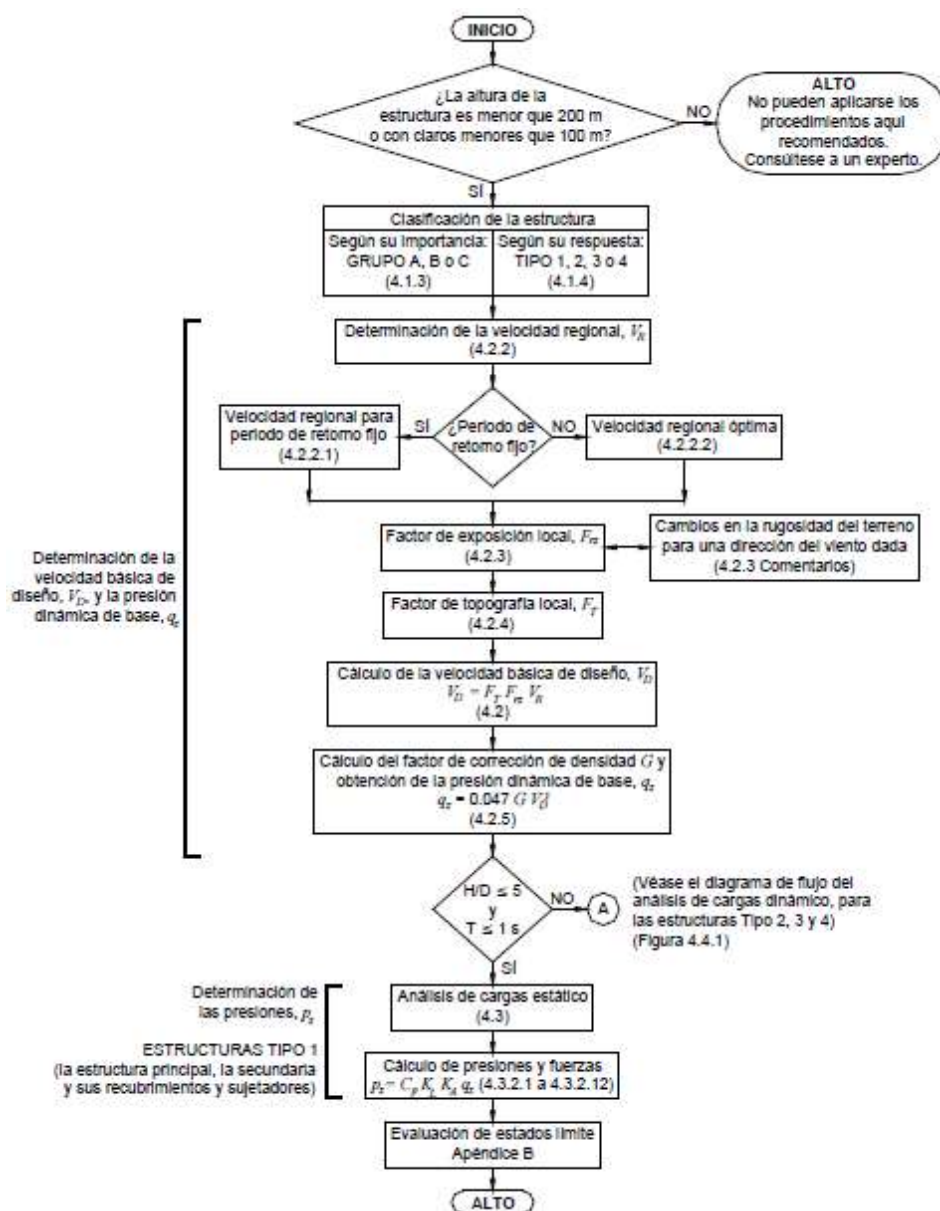
Tipo	Ejemplos	Efectos a considerar
1	Edificios para casa habitación u oficinas, bodegas, naves industriales, teatros y auditorios, puentes cortos, construcciones cerradas con sistema de cubierta rígidos	Respuesta de la estructura ante el empuje medio del viento. Se empleará la velocidad básica de diseño
2	Torres de celosía atirantadas, chimeneas, tanques elevados, antenas, bardas, parapetos, anuncios y construcciones con pequeña dimensión paralela a la dirección del viento	Acción dinámica generada por la turbulencia del viento al interactuar con la estructura
3	Edificios con sección circular o prismáticos esbeltos, tuberías exteriores o elevadas, chimeneas, arbotantes para iluminación y postes de distribución	Criterios establecidos para las del Tipo 2, además, se revisará su capacidad para resistir los empujes dinámicos transversales generados por los vórtices alternantes
4	Estructuras con formas aerodinámicamente inestables como cables de líneas de transmisión, tuberías colgantes y antenas parabólicas	Se evaluarán mediante estudios analíticos y/o experimentales. En estructuras que resulten sensibles a los efectos dinámicos del viento, su análisis se basará en resultados de las pruebas de prototipos o modelos en túnel de viento

### Procedimientos para evaluar las acciones generadas por viento

El MDOCDV 2008, propone dos procedimientos analíticos y uno referente a un análisis experimental en modelos representativos: el análisis estático y el análisis dinámico. Ambos procedimientos se explicarán más adelante. El primero se aplicará a estructuras del Tipo 1 y el segundo se aplicará a los tipos restantes. El tercer procedimiento refiere a pruebas experimentales

en modelos en túnel de viento que deben realizarse cuando no exista información disponible en reglamentos o en literatura técnica.

Finalmente, el MDOCDV 2008 establece un diagrama de flujo del procedimiento para obtener las cargas de diseño por viento (figura 22).



**Figura 22 Diagrama de flujo del proceso de diseño por viento (MDOCDV, 2008) Nota: Los números dentro de los paréntesis, figuras y apéndices mostrados corresponden a los del MDOCDV 2008, mas no a los de este trabajo**

## Velocidad básica de diseño, $V_D$

La velocidad básica de diseño,  $V_D$ , es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de la misma. Se determina al evaluar cuantitativamente varios aspectos, como los que se listan a continuación:

- a) Variación de la velocidad del viento con la altura. Esta variación se da principalmente en función de las características de rugosidad del terreno.
- b) Efectos locales que la topografía del lugar induce sobre ella.
- c) Probabilidad de que una cierta velocidad sea excedida en un año cualquiera, esta probabilidad es el inverso del periodo de retorno.

El periodo de retorno,  $T$ , es el tiempo promedio durante el cual la velocidad regional pueda excederse. Esto no significa que dicha velocidad tenga una recurrencia media de  $T$  años, ni tampoco que con seguridad se excederá solo una vez en  $T$  años.

La velocidad básica de diseño consta de un ajuste de la velocidad regional debido a las características del terreno como la rugosidad y el tipo de topografía, para ello se deben considerar dos factores adimensionales: factor de topografía local y un factor de exposición local.

La expresión para determinar la velocidad básica de diseño es la siguiente:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad (2.63)$$

Donde:

- $F_T$  factor que depende de la topografía local, adimensional.
- $F_{rz}$  factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional.
- $V_R$  velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio donde se construirá la estructura, en km/h.

## Categorías de terrenos según su rugosidad

Para la selección de los factores, es necesario tomar en cuenta las condiciones topográficas y de exposición locales, para ello, el MDOCDV 2008 presenta cuatro categorías del terreno según su rugosidad. La rugosidad del terreno se basa en el tamaño y número de las obstrucciones cercanas a la construcción, si son grandes y numerosas se dice que la superficie es rugosa; si por el contrario son pequeñas y muy espaciadas, la superficie se considera lisa o suave. La influencia de las obstrucciones sobre el viento es que provoca una mayor turbulencia; a mayor rugosidad, mayor turbulencia. El factor de exposición y el factor de topografía deben relacionarse con las características del sitio de desplante de la estructura.

En la dirección del viento que se esté analizando, el terreno inmediato a la estructura deberá presentar la misma rugosidad (categoría), cuando menos en una distancia denominada “longitud mínima de desarrollo”. Cuando no exista esta longitud mínima, el factor de exposición local,  $F_{rz}$ , deberá modificarse para tomar en cuenta este hecho. En dicho caso se podrá seleccionar entre las categorías de los terrenos que se encuentren en una dirección dada, la que provoque los efectos más desfavorables y determinar el factor de exposición para tal categoría. Las categorías según la rugosidad del terreno son las siguientes:

- *Categoría 1.* Terreno abierto, plano, sin obstrucciones y superficie de agua. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
- *Categoría 2.* Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones. Las obstrucciones existentes tienen alturas de 1.5 a 10 m, la longitud mínima debe ser la mayor entre 1500 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar.
- *Categoría 3.* Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. Las obstrucciones existentes presentan alturas de 3 a 5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
- *Categoría 4.* Por lo menos el 50% de los edificios tiene una altura mayor que 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser mayor entre 400 y 10 veces la altura de la nueva construcción.

Algunos ejemplos correspondientes a cada categoría se presentan en la Tabla 12.

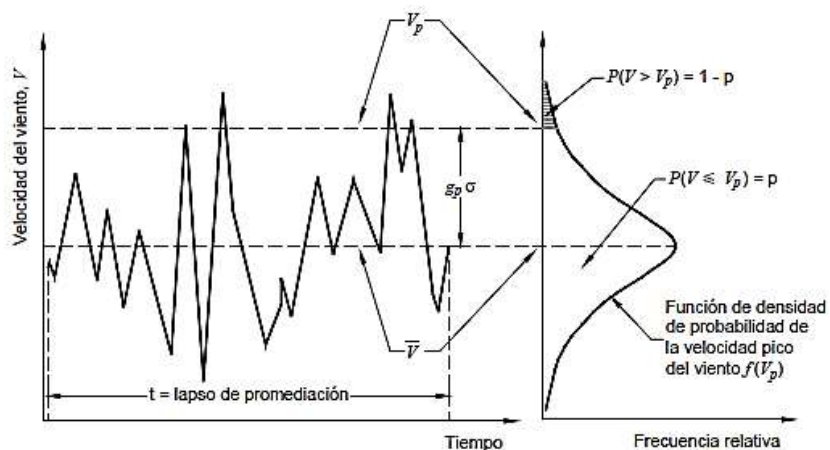
**Tabla 12 Ejemplos de categoría del terreno**

<b>Categoría</b>	<b>Ejemplos</b>
1	Franjas costeras planas, zonas de pantanos o de lagos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas alrededor, superficies nevadas planas
2	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas
3	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas
4	Centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados

Un aspecto importante a considerar es que la velocidad del viento aumenta con la altura, a partir del terreno. La variación con la que se incrementa depende no solo de las condiciones de rugosidad del terreno circundante, sino también de las ráfagas cortas o velocidades medias del viento, es decir, velocidades asociadas con lapsos de promediación diferentes. El lapso de



promediación es el intervalo de tiempo que se selecciona para determinar la velocidad máxima promedio (figura 23). La relación que existe entre el lapso de promediación del flujo del viento y una estructura que será diseñada bajo la acción del viento, es la velocidad máxima media, es decir, conforme el intervalo disminuye, aumenta la velocidad máxima media que le corresponde. Cuando una estructura es esbelta y flexible es afectada por ráfagas de corta duración, mientras que cuando una estructura es baja y rígida, es afectada por velocidades medias asociadas al flujo.



**Figura 23 Lapso de promediación y probabilidad de excedencia (MDOCDV, 2008)**

Existe un factor denominado *factor de ráfaga*, que establece la relación que existe la velocidad máxima promediada sobre un lapso  $t_1$ , y otra promediada sobre un lapso mayor,  $t_2$ . Dicho factor es posible determinarlo de manera gráfica con el método de Durst para una Categoría 2 del terreno y a una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno natural (figura 24).

El procedimiento permite pasar de velocidades medias horarias ( $t_2 = 1 \text{ hora}$ ) a velocidades de ráfaga ( $t_1 = 3 \text{ segundos}$ ) por mencionar un caso en específico, siguiendo la siguiente relación:

$$\frac{V_{t_1}}{V_{t_2}} = 1 \quad (2.64)$$

Por ejemplo, para pasar de una velocidad de viento promediada en 10 min de 105 km/h a una velocidad de ráfaga, utilizando la relación definida por la ecuación 2.64 y junto con la gráfica de Durst (figura 24), se procede de la siguiente manera:

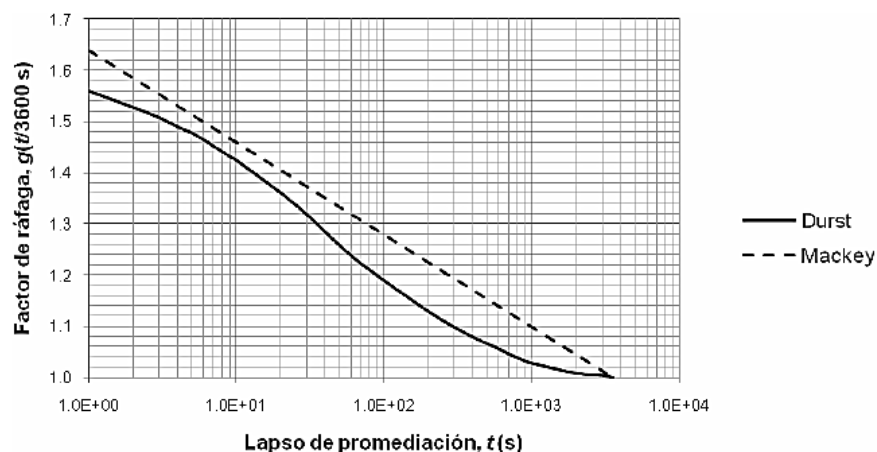
$$\frac{V_{t_1}}{V_{3600 \text{ s}}} = \frac{V_{3 \text{ s}}}{V_{3600 \text{ s}}} \quad ; \quad \frac{V_{t_2}}{V_{3600 \text{ s}}} = \frac{V_{600}}{V_{3600 \text{ s}}}$$

Donde, ubicando los lapsos de promediación de 3 y 600 segundos que se requieren, se tiene lo siguiente:

$$V_{3600 \text{ s}} = 105 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad ; \quad \frac{V_{3 \text{ s}}}{V_{3600 \text{ s}}} \approx 1.52 \quad ; \quad \frac{V_{600}}{V_{3600 \text{ s}}} \approx 1.07$$

Por lo tanto:

$$V_{3s} = V_{3600s} \left( \frac{V_{3s}}{V_{600s}} \right) = 105 \frac{km}{h} \left( \frac{1.52}{1.07} \right) = 149.15 \frac{km}{h}$$



**Figura 24** Factor de ráfaga  $g(t/3600s)$  para una Categoría 2 de terreno y a una altura de 10 m sobre el nivel del terreno natural (MDOCDV, 2008)

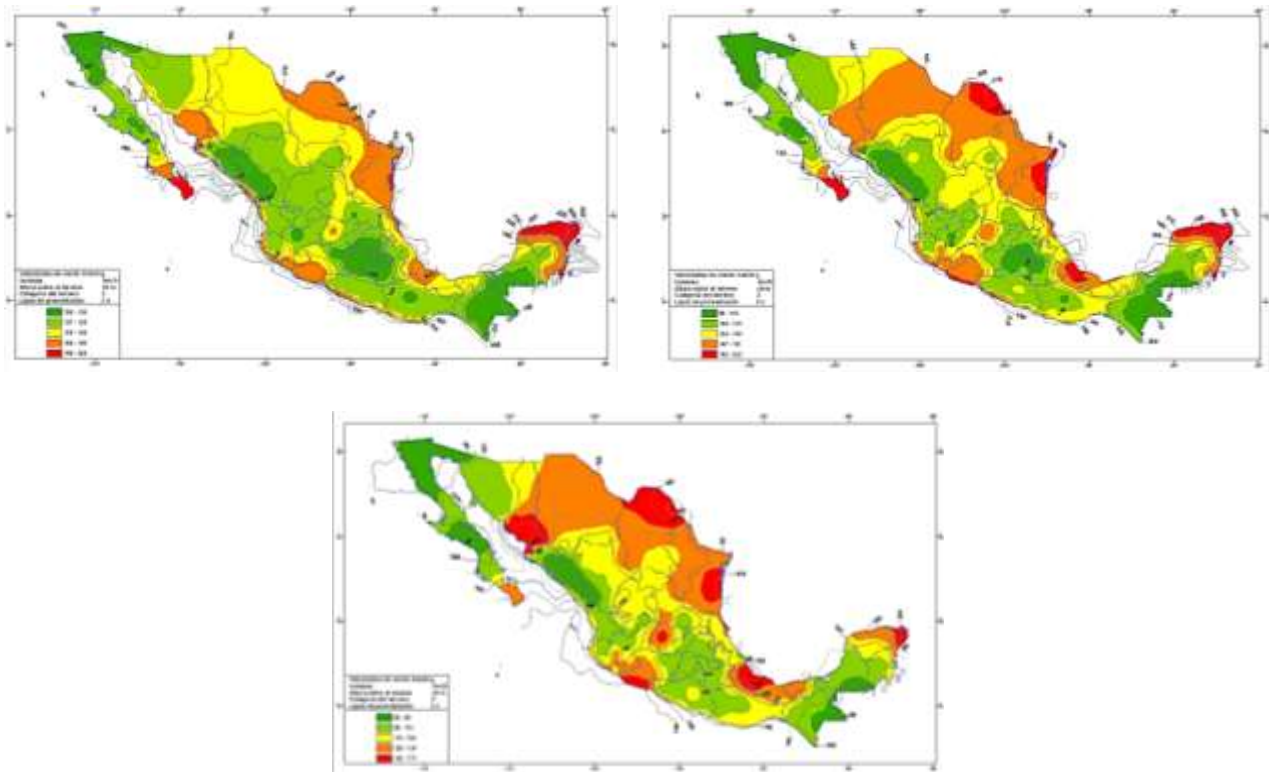
### Velocidad regional, $V_R$

La velocidad regional de ráfaga del viento,  $V_R$ , es la velocidad máxima que puede ser excedida en un cierto periodo de retorno,  $T$ , en años, en una zona o región determinada del país y es posible determinarla tomando en consideración tanto la importancia de la estructura como la localización.

Con base en los registros obtenidos de velocidades máximas mensuales de un número de años, en un número adecuado de estaciones meteorológicas, fue posible estimar la velocidad máxima del viento que pudo presentarse en un cierto periodo y mediante el uso de técnicas de la estadística de valores extremos, el MDOCDV, establece un mapa de velocidades de ráfaga de la República Mexicana para un periodo de retorno de 10, 50 y 200 años denominado *Mapa de Isotacas* (figura 25).

Además, dado que las condiciones de topografía y rugosidad, difieren de una estación meteorológica a otra, fue necesario normalizar las velocidades registradas sobre una base común. La normalización consistió en referir las velocidades del viento a una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno y a un sitio libre de obstáculos, con topografía prácticamente plana Categoría 2.

El único inconveniente de los mapas de isotacas es que las velocidades regionales pueden no ser estrictamente aplicables a localidades específicas, debido a la escasa información de la región, como lo son, la parte central del norte y en la del noroeste del país. Dichas regiones resaltan, en el mapa de isotacas, por el hecho de que las isotacas se encuentran muy separadas entre sí, por ello, es necesario aplicar con precaución técnicas de interpolación.



**Figura 25** Mapa de isotacas asociado a distintos periodos de retorno. 200 años (sup-izq), 50 años (sup-der) y 10 años (inf-centro) (MDOCDV, 2008)

### Velocidad regional óptima, $Q$

La velocidad regional óptima,  $V_{RO}$ , en km/h, es la máxima velocidad para la cual se minimiza el costo total determinado con el costo inicial de la construcción más el costo de las reparaciones y de las pérdidas, directas e indirectas, en caso de presentarse una falla. El costo de la falla (reparaciones y pérdidas) se introduce en un parámetro adimensional,  $Q$ , llamado factor de importancia de las perdidas dado por:

$$Q = \frac{C_L}{C_I} \quad (2.65)$$

Donde:

$C_I$  costo inicial de la construcción.

$C_L$  costo de las pérdidas directas e indirectas que se tendrían en caso de una falla estructural.

Para este procedimiento, existen mapas de isotacas correspondientes a los niveles de importancia de las estructuras, donde para las del Grupo A se asocia un valor de  $Q = 15$  y para las del Grupo

B se asocia el valor de  $Q = 5$ , así, la manera simplificada de utilizar este procedimiento es seleccionando la velocidad regional óptima de los mapas de isotacas (figura 26).

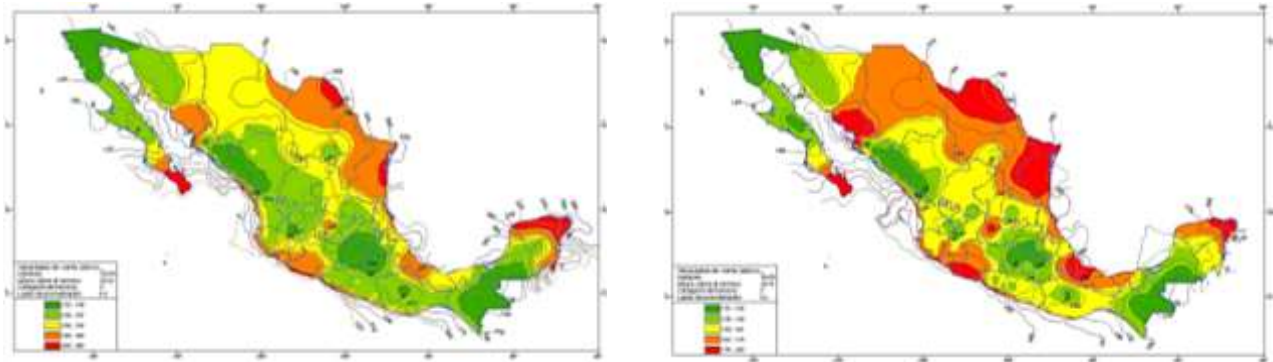


Figura 26 Mapa de isotacas asociado a un factor de diseño óptimo.  $Q=15$  (izq) y  $Q=5$  (der) (MDOCDV, 2008)

### Factor de exposición, $F_{rz}$

Para establecer la variación de la velocidad del viento con la altura, misma que está en función de la categoría del terreno, se define un factor de exposición,  $F_{rz}$ .

Las características del flujo del viento cambiarán de manera asintótica con la altura conforme la rugosidad vaya cambiando, es decir, se presentará un efecto de retraso que modificará el perfil de velocidad del viento en las zonas más cercanas al suelo.

Por lo tanto, al cambiar de tipo de rugosidad, deberá realizarse una corrección al factor de exposición,  $F_{rz}$ , la cual se efectúa en el sentido viento arriba hacia el viento abajo, hasta el sitio de desplante de la estructura. El procedimiento para desarrollar la corrección del factor de exposición se encuentra en el Tomo II de Recomendaciones del MDOCDV 2008, Capítulo 4.2.3.

La expresión que se debe utilizar para calcular el factor de exposición es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 F_{rz} &= c & \text{si} & \quad z \leq 10 \\
 F_{rz} &= c \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha & \text{si} & \quad 10 < z < \delta \\
 F_{rz} &= c \left( \frac{\delta}{10} \right)^\alpha & \text{si} & \quad z \geq \delta
 \end{aligned} \tag{2.66}$$

Donde:

- $c$  coeficiente de escala de rugosidad, adimensional.
- $z$  altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m.

- $\alpha$  exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional.
- $\delta$  altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y puede suponerse constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente, en m.

Las variables  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $c$  están en función de la rugosidad del terreno, los valores que recomienda el MDOCDV 2008 se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 13 Valores de  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $c$  (MDOCDV, 2008)**

Categoría del terreno	$\alpha$	$\delta$ [m]	$c$
1	0.099	245	1.137
2	0.128	315	1.0
3	0.156	390	0.881
4	0.170	455	0.815

Los valores de  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $c$ , pueden ser obtenidos tomando en cuenta como base una variación de potencia de la velocidad del viento con respecto a la altura a las diferentes Categorías del terreno y al lapso de promediación de la velocidad. Dicha variación se dedujo gracias a diversos estudios experimentales en el mundo y es empleada por diferentes reglamentos internacionales.

Por lo tanto, para un terreno perteneciente a la Categoría 2, la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura está dada por:

$$V_z = V_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^{\alpha_2} \quad (2.67)$$

Donde:

- $V_z$  velocidad del viento a una altura  $z$ , en km/h.
- $V_{10}$  velocidad regional de ráfaga que se presenta a una altura base de 10 metros para una Categoría 2 del terreno, en km/h.
- $\alpha$  exponente correspondiente al terreno con Categoría 2.

La ecuación 2.67 sólo es válida solo para terreno Categoría 2, sin embargo, es posible determinar una expresión que permite conocer la variación de la velocidad del viento para una Categoría  $n$  del terreno. Dicha variación se determina con la siguiente ecuación:

$$V_{zn} = 1.56 V_{10} \left( \frac{z_n}{\delta_n} \right)^{\alpha_n} \quad (2.68)$$

Donde:

- $V_{zn}$  velocidad del viento a una altura  $z$ , para cualquier categoría del terreno, en km/h.
- $V_{10}$  velocidad regional de ráfaga que se presenta a una altura base de 10 metros, para una Categoría 2 del terreno.
- $z_n$  altura por encima de la superficie del suelo.
- $\alpha_n$  exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura.
- $\delta_n$  altura gradiente para cualquier categoría del terreno.

Los subíndices,  $n$ , corresponden a una Categoría de terreno,  $n$ , según se desee conocer.

El desarrollo algebraico que permitió dar a conocer la ecuación anterior y el procedimiento para determinar los valores de las constantes presentes en la Tabla 13 se encuentran detallados en el Tomo II de recomendaciones del MDOCDV 2008.

#### **Factor de topografía, $F_T$**

Otro factor importante en la determinación de la velocidad básica de diseño es el factor de topografía, mismo que toma en cuenta el efecto topográfico del sitio de desplante de la estructura, es decir, si una construcción se localiza en laderas o cimas de colinas o montañas de altura importante con respecto al nivel general del terreno de los alrededores, es muy probable que se generen aceleraciones del flujo del viento y, por consiguiente, deberá incrementarse la velocidad regional.

Para ello, el MDOCDV 2008 establece tres sitios a los cuales les corresponde un factor de topografía local, dichos valores junto con ejemplos se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14 Factor de topografía local,  $F_T$  (MDOCDV, 2008)**

Sitios	Ejemplos de topografía local	$F_T$
<b>Protegidos</b>	Valles cerrados	0.9
<b>Normales</b>	<i>Terreno prácticamente plano:</i> Campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%	1.0
<b>Expuestos</b>	<i>Promontorios:</i> Montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas <i>Terraplenes:</i> Peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas	Consultar MDOCDV 2008

Para el caso del cálculo del factor de topografía para los sitios expuestos, se trata de una serie de condiciones basadas en la forma del terreno, donde cada caso se maneja con un procedimiento particular, el cual, por razones de optimización no se incluyeron en este apartado. Dicha información se puede consultar el Capítulo 4.2.4 del MDOCDV 2008.

### Presión dinámica de base, $q_z$

La acción del viento sobre las estructuras genera presiones sobre las superficies, mismas que varían según la velocidad y dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, se denomina presión dinámica de base,  $q_z$ , en Pa, y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.0048 G V_D^2 \quad (2.69)$$

Donde:

$G$  factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional.

$q_z$  presión dinámica de base a una altura  $z$  sobre el nivel del terreno, en Pa.

$V_D$  velocidad básica de diseño, en km/h.

El valor de  $G$  se obtiene con la siguiente expresión:

$$G = \frac{0.392 \Omega}{273 + \tau} \quad (2.70)$$

Donde:

$\Omega$  presión barométrica, en mm de Hg (tabla 15).

$\tau$  temperatura ambiental, en °C.

**Tabla 15 Relación entre la altitud y la presión barométrica (MDOCDV, 2008)**

Altitud [msnm]	Presión barométrica [mm de Hg]
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

El valor de 0.0048 en la ecuación 2.69, resulta de considerar el valor de la densidad del aire al nivel del mar y a 15°C junto con una serie de ajustes para que sea consistente con las unidades de trabajo, de la siguiente manera:

$$\frac{1}{2}\rho = \frac{1}{2} 1.225 \frac{kg}{m^3} = 0.6125 \frac{kg}{m^3}$$

Debido a que la ecuación 2.69, está en función de la velocidad del viento en km/h, se necesita realizar un ajuste algebraico de tal manera que resulte en unidades de presión. Por lo tanto, el desarrollo de dicho ajuste queda como sigue:

$$\begin{aligned} 0.6125 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{km}{h}\right)^2 \left(\frac{h}{km}\right)^2 &= 0.6125 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1000 m}{1 km}\right)^2 \left(\frac{1 h}{3600 s}\right)^2 \left(\frac{km}{h}\right)^2 \left(\frac{h}{km}\right)^2 \\ 0.047 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{h}{km}\right)^2 \left(\frac{m}{s}\right)^2 &= 0.047 \left(\frac{kg * m}{s^2}\right) \left(\frac{1}{m^2}\right) \left(\frac{h}{km}\right)^2 = 0.047 \left(\frac{N}{m^2}\right) \left(\frac{h}{km}\right)^2 \\ 0.047 \left(\frac{N}{m^2}\right) \left(\frac{1 kg_f}{9.81 N}\right) \left(\frac{h}{km}\right)^2 &= 0.004817 \left(\frac{kg_f}{m^2}\right) \left(\frac{h}{km}\right)^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, al involucrar la velocidad básica de diseño en  $\left(\frac{km}{h}\right)^2$  y los demás factores antes mencionados al ajuste anterior, resulta consistente en las unidades de presión con las que se está trabajando.

$$\left[ 0.0048 \left(\frac{kg_f}{m^2}\right) \left(\frac{h}{km}\right)^2 G V_D^2 \right]$$

### Presión y fuerza actuante sobre estructuras, $p_z$ y $F_{es}$

La presión actuante sobre una construcción determinada,  $p_z$ , en Pa, se obtiene tomando en cuenta principalmente su forma y está dada, de manera general, por la siguiente ecuación:

$$p_z = C_p q_z \quad (2.71)$$

Donde:

$C_p$  coeficiente de presión, adimensional.

$q_z$  presión dinámica de base, en Pa.

El coeficiente de presión se define como la relación de la presión actuante sobre la construcción o sobre una de sus superficies, con la presión dinámica de base, para una altura dada. Este coeficiente determina el efecto de la variación de la presión, según la geometría o forma de la construcción, así como de la intensidad de la velocidad y la turbulencia del flujo del viento.

Las fuerzas producidas por la interacción del viento y la respuesta estructural, en una dirección dada, se determinarán considerando la respuesta estática o la dinámica.

La respuesta estructural, ante la acción del viento, depende de las propiedades dinámicas de la construcción y puede dividirse en tres tipos diferentes:



- *Respuesta estática.* Ocurre en estructuras no sensibles a efectos dinámicos con frecuencias naturales de vibración considerablemente mayores que el intervalo de frecuencias de la turbulencia. La fuerza estática se calcula con la siguiente expresión:

$$F_{es} = \Sigma(q_z C_p A_{ref}) \quad (2.72)$$

Donde:

$A_{ref}$  área de referencia sobre la que actúa la presión, en  $m^2$ .

$C_p$  coeficiente de presión, adimensional, actuando sobre una construcción o un área de ésta.

$q_z$  presión dinámica de base, en Pa.

- *Respuesta dinámica.* Ocurre en estructuras sensibles a los efectos dinámicos, con una o más frecuencias naturales dentro del intervalo de las frecuencias de la turbulencia. En este caso, las fuerzas dinámicas que se generan se evalúan mediante una fuerza equivalente,  $F_{eq}$ , que se obtiene al multiplicar la fuerza estática,  $F_{es}$ , por el Factor de Amplificación Dinámica,  $F_{AD}$ .

$$F_{eq} = F_{es} F_{AD} \quad (2.73)$$

- *Respuesta aeroelástica.* Ocurre cuando la respuesta estructural interactúa con la generación de las cargas de viento, produciendo fenómenos de inestabilidad aeroelástica. Algunas recomendaciones referentes a este tipo de respuesta se presentan en el inciso 4.4 del MDOCDV 2008 y en su respectivo Apéndice B.

## Análisis estático

El análisis estático se aplica en el diseño de construcciones y elementos estructurales pertenecientes al Tipo 1, que sean poco sensibles a la acción turbulenta del viento, así como de los elementos de recubrimiento y sus anclajes que se emplean en las construcciones pertenecientes a los Tipos 1, 2 y 3.

Una construcción es poco sensible a la acción turbulenta del viento cuando satisfagan las siguientes condiciones:

- a) La relación de esbeltez  $\frac{H}{D} \leq 5$ .
- b) El periodo fundamental de la estructura es menor o igual que un segundo.

Para el caso de construcciones cerradas, techos aislados y toldos y cubiertas adyacentes, no es necesario calcular su periodo fundamental cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- a) La altura de la construcción sea  $H \leq 15 m$ .
- b) La estructura no se encuentre en un promontorio o terraplén.

- c) La planta de la estructura es rectangular o formada por una combinación de rectángulos.
- d) La relación de esbeltez sea  $\frac{H}{D} < 4$  para construcciones cerradas y  $\frac{H}{D} < 1$  para techos aislados, toldos y cubiertas adyacentes en voladizo; el claro no debe ser mayor que 5 m.
- e) Para construcciones cerradas y techos aislados, la pendiente de sus techos no debe exceder los 20°; en techos de claros múltiples deberá ser menor que 60°.

Las fuerzas estáticas que se ejercen sobre los muros y techos de estructuras cerradas, deberán ser las resultantes de las presiones actuantes sobre sus superficies exteriores e interiores y se calculan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$F_{es} = p_z A_z \tag{2.74}$$

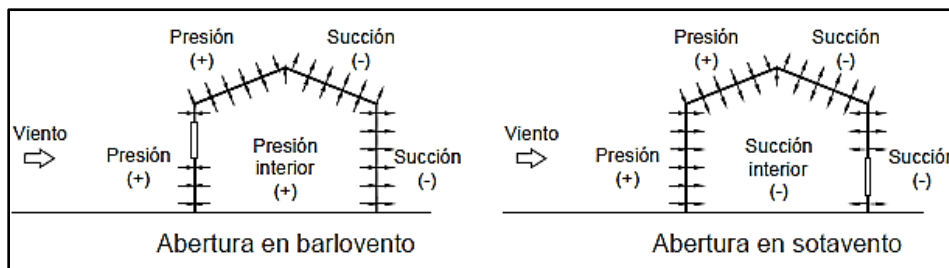
Donde:

$$p_z = (p_e - p_i) \tag{2.75}$$

La ecuación 2.75, solo aplica para construcciones cerradas.

- $A_z$  área de la estructura o parte de ella a la altura  $z$ , sobre la que actúa la presión de diseño,  $p_z$ , en  $m^2$ .
- $F_{es}$  fuerza estática resultante del viento que actúa perpendicularmente sobre las superficies o elementos estructurales de la construcción.
- $p_e$  presión exterior, en Pa.
- $p_i$  presión interior, en Pa.
- $p_z$  presión de diseño a la altura  $z$ , en Pa.

Cuando las presiones ejerzan un empuje sobre la estructura, se tomarán en cuenta con signo positivo, mientras que cuando ejerzan succión, se tomarán en cuenta con signo negativo. Para ilustrar la convención de signos que establece el MDOCDV 2008, se presenta la Figura 27, donde se aprecian dos casos: construcción cerrada y construcción con una abertura en sotavento.



**Figura 27 Convención de signos para las presiones ejercidas por el viento en una edificación con aberturas en barlovento o sotavento (MDOCDV, 2008)**

## Presiones exteriores, $p_e$

Para determinar la presión exterior sobre una de las superficies de una construcción cerrada, se utiliza la siguiente ecuación:

$$p_e = C_{pe} K_A K_L q_z \quad (2.76)$$

Donde:

$C_{pe}$  coeficiente de presión exterior, adimensional.

$K_A$  factor de reducción de presión por tamaño de área, adimensional.

$K_L$  factor de presión local, adimensional.

$p_e$  presión exterior, en Pa.

$q_z$  presión dinámica de base del viento, en Pa.

Es importante señalar que la denominación de los muros (barlovento o sotavento), depende de la dirección en la que actúa el viento. Algunos valores recomendados del coeficiente de presión exterior en muros de barlovento y sotavento, cuando se trate de una construcción cerrada con planta rectangular, se dan en la Tabla 16 mientras que, para los muros laterales de construcciones cerradas, los valores recomendados se encuentran en la Tabla 17.

**Tabla 16 Coeficientes de presión exterior,  $C_{pe}$ , para muros en barlovento y sotavento de construcciones cerradas (MDOCDV, 2008)**

Muro	Dirección del viento $\theta$ , en grados	d/b	Inclinación del techo $\gamma$ , en grados	$C_{pe}$
Barlovento	Normal ( $\theta = 0^\circ$ ) o paralela ( $\theta = 90^\circ$ ) a las generatrices	Cualquiera	Cualquiera	0.8
Sotavento	Normal ( $\theta = 0^\circ$ ) o paralela ( $\theta = 90^\circ$ ) a las generatrices, para techos a cuatro aguas.	$\leq 1$	$< 10^\circ$	-0.5
		$= 2$		-0.3
		$\geq 4$		-0.2
	Normal ( $\theta = 0^\circ$ ) a las generatrices, para techos a una o dos aguas	Cualquiera	$10^\circ \leq \gamma \leq 15^\circ$	-0.3
			$20^\circ$	-0.4
		$\leq 0.1$	$\geq 25^\circ$	-0.75
		$\geq 0.3$		-0.5
		Paralela ( $\theta = 90^\circ$ ) a las generatrices, para techos a una o dos aguas	$\leq 1$	Cualquiera
$= 2$	-0.3			
$\geq 4$	-0.2			

**Tabla 17 Coeficiente de presión exterior,  $C_{pe}$ , para zonas de muros laterales de construcciones cerradas (MDOCDV, 2008)**

Distancia horizontal a lo largo de un muro lateral medida a partir de la arista común con el muro de barlovento	Coeficiente de presión exterior $C_{pe}$
de 0 a $1\bar{h}$	-0.65
de $1\bar{h}$ a $2\bar{h}$	-0.5
de $2\bar{h}$ a $3\bar{h}$	-0.3
$> 3\bar{h}$	-0.2

Para algunos casos particulares de techos a una, dos o cuatro aguas, los coeficientes de presión exterior se pueden consultar en el Capítulo 4.3.2.1.1 del MDOCDV 2008.

### **Factor de reducción de presión por tamaño de área, $K_A$**

En el cálculo de este factor interviene el área tributaria, misma que se considera como aquella sobre la cual actúa la presión de diseño. Los valores del factor,  $K_A$ , en techos y muros laterales se presentan en la Tabla 18.

Este factor se utiliza principalmente para corregir las cargas pico que se presentan cuando las áreas tributarias son grandes.

La presión exterior,  $p_e$ , se verá afectada por el factor  $K_A$ , cuando se diseñen los siguientes elementos:

- Estructura principal que soporta techos y muros laterales.
- Recubrimientos de techos y muros.
- Elementos que sostienen los recubrimientos (tales como largueros).
- Sistemas de sujeción de dichos recubrimientos.

El factor,  $K_A$ , será igual a la unidad cuando se diseñen:

- Muros de silos.
- Tanques cilíndricos.
- Techos aislados.
- Muros de barlovento y sotavento.
- Casos no contemplados en el MDOCDV 2008.

**Tabla 18 Factor de reducción,  $K_A$ , para techos y muros laterales (MDOCDV, 2008)**

Área tributaria en $m^2$ $A$	Factor de reducción $K_A$
$\leq 10$	1.0
25	0.9
$\geq 100$	0.8

## Factor de presión local, $K_L$

El factor de presión local,  $K_L$ , permite tomar en cuenta que, en ciertas áreas pequeñas, la presión del viento presenta un valor marcadamente mayor que el del promedio de la superficie en estudio. Por medio de este factor se consideran los valores máximos instantáneos que ocurren en diferentes áreas y, de manera específica, aquellas de muros laterales cercanas a las esquinas de barlovento y a los bordes de techos.

La presión exterior,  $p_e$ , será afectada por el factor  $K_L$  cuando se diseñen los siguientes elementos:

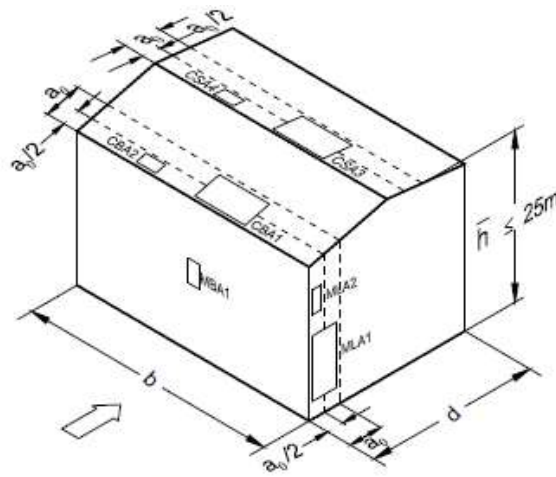
- Recubrimientos de techos y muros de barlovento y laterales.
- Elementos que soportan los recubrimientos (tales como largueros).
- Sistemas de sujeción de los recubrimientos.

El factor,  $K_A$ , será igual a la unidad cuando se diseñen:

- La estructura principal de la construcción.
- Muro de sotavento.
- Algún elemento de recubrimiento o área tributaria de un miembro de soporte que excedan las áreas de afectación indicadas en la Tabla 19, el valor de 1.0 se considerara en el área restante de dicho elemento.

**Tabla 19 Factor de presión local,  $K_L$ , para recubrimientos y sus soportes (MDOCDV, 2008)**

Presión externa	Referencia de las áreas	$\bar{r}$ (m)	Área de afectación $A_f$ (m <sup>2</sup> )	Proximidad al borde	$K_L$
Empuje (+)	MBA1	Cualquiera	$\leq 0.25 a_0^2$	Cualquiera	1.25
Succión (-)	CBA1	Cualquiera	$\leq a_0^2$	$< a_0$	1.50
	CBA2	Cualquiera	$\leq 0.25 a_0^2$	$< 0.5 a_0$	2.00
	CSA3	Cualquiera	$\leq a_0^2$	$< a_0$	1.50
	CSA4	Cualquiera	$\leq 0.25 a_0^2$	$< 0.5 a_0$	2.00
	MLA1	$\leq 25$	$\leq a_0^2$	$< a_0$	1.50
	MLA2	$\leq 25$	$\leq 0.25 a_0^2$	$< 0.5 a_0$	2.00
	MLA3	$> 25$	$\leq 0.25 a_0^2$	$> a_0$	1.50
	MLA4 MLA5	$> 25$	$\leq a_0^2$ $\leq 0.25 a_0^2$	$< a_0$ $< 0.5 a_0$	2.00 3.00
Todas las otras áreas, empuje o succión.	—	Cualquiera	—	—	1.00



NOTA: La dimensión "a," debe tomarse como la mínima de 0.2b, 0.2d y 7.

**Figura 28 Zonas para la determinación de los factores de presión,  $K_L$ , para recubrimientos y sus soportes (MDOCDV, 2008)**

Las especificaciones y detalles sobre las zonas donde se requiera considerar el factor de presión local, así como las figuras que permiten identificar las variables que intervienen en su desarrollo se encuentran en el Capítulo 4.3.2.1.1 del MDOCDV 2008.

### Presiones interiores, $p_i$

La expresión que permite determinar la presión interior solo contempla un factor que multiplica a la presión dinámica de base, esta expresión es la siguiente:

$$p_i = C_{pi} q_z \tag{2.77}$$

Donde:

$C_{pi}$  coeficiente de presión interior, adimensional.

$p_i$  presión interior, en Pa.

$q_z$  presión dinámica de base, en Pa.







La presión interior se considera constante sobre todas las superficies interiores de la construcción y solo se utiliza en construcciones que son consideradas como “permeables” según el MDOCDV 2008.

Tanto para el cálculo de las presiones exteriores como interiores, se considerará la altura promedio de la construcción,  $\bar{h}$ .

Los distintos valores del coeficiente de presión interior se encuentran en dos tablas, las cuales están clasificadas con base en el grado de aberturas que presenta la construcción. Estas tablas

emplean dos conceptos: construcciones con muros permeables (tabla 20) y con aberturas dominantes.

**Tabla 20 Coeficiente de presión interior,  $C_{pi}$ , para construcciones con planta rectangular cerrada y muros permeables**

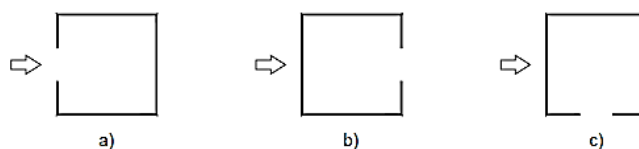
Casos	$C_{pi}$	Ejemplo
<b>1. Un muro permeable</b>		
a) Muro de barlovento permeable	0.6	
b) Muro de barlovento impermeable	-0.3	
<b>2. Dos o tres muros permeables</b>		
c) Muro de barlovento permeable	-0.1 o 0.2	
d) Muro de barlovento impermeable	-0.3	
<b>3. Todos los muros permeables</b>		
	0.3 o 0.0	
<b>4. Construcciones selladas eficientemente con muros y ventanas que no puedan abrirse</b>		
	-0.2 o 0.0	
Nota		----- permeable ———— impermeable

El coeficiente de presión interior para construcciones con aberturas dominantes, se basa en una relación de áreas de aberturas dominantes con respecto al total de aberturas de techo y otros muros de la construcción. Mientras dicha relación no exceda el límite de 0.5, el valor del coeficiente de presión interior será de -0.3 o 0.0 el más desfavorable, para todos los casos de ubicación de las aberturas, ya sea muro de barlovento, sotavento, lateral y en techo. Cuando la relación de áreas supera el valor de 0.5, el coeficiente de presión interior será lo especificado en la Tabla 21.

**Tabla 21 Coeficiente de presión interior,  $C_{pi}$ , para construcciones con planta rectangular cerrada y muros y techos con aberturas dominantes (MDOCDV, 2008)**

Ubicación de aberturas dominantes	Relación entre el área de las aberturas dominantes y la suma de las áreas de las aberturas del techo y de los otros muros (incluyendo el área de posible permeabilidad)				
	$\leq 0.5$	1	2	3	$\geq 6$
a) Muro de barlovento (MB)	-0.3, 0.0	-0.1, 0.2	0.7 $C_{pe}$	0.85 $C_{pe}$	$C_{pe}$
b) Muro de sotavento (MS)	-0.3, 0.0	-0.3, 0.0	0.7 $C_{pe}$	0.85 $C_{pe}$	$C_{pe}$
c) Muro lateral (ML)	-0.3, 0.0	-0.3, 0.0	0.7 $C_{pe}$	0.85 $C_{pe}$	$C_{pe}$
d) En el techo	-0.3, 0.0	-0.3, 0.15 $C_{pe}$	0.7 $C_{pe}$	0.85 $C_{pe}$	$C_{pe}$

Los ejemplos de las diferentes aberturas que se mencionan en la Tabla 21, se encuentran en la Figura 29.



**Figura 29 Ejemplos que muestran diferentes casos de aberturas en muros de edificaciones (MDOCDV, 2008)**

El MDOCDV 2008, establece procedimientos adicionales para casos de construcciones con distintas configuraciones de techos tales como inclinaciones con ángulos distintos, cubiertas de arco circular o techos en voladizo por mencionar algunos.

Debido al alcance de este trabajo, la información que se presenta se remite al diseño de edificios únicamente, por lo que el cálculo de presiones en silos, tanques cilíndricos, chimeneas, torres de telecomunicaciones, etc., se pueden consultar en el Capítulo 4.3.2 del MDOCDV 2008.

### **Análisis dinámico**

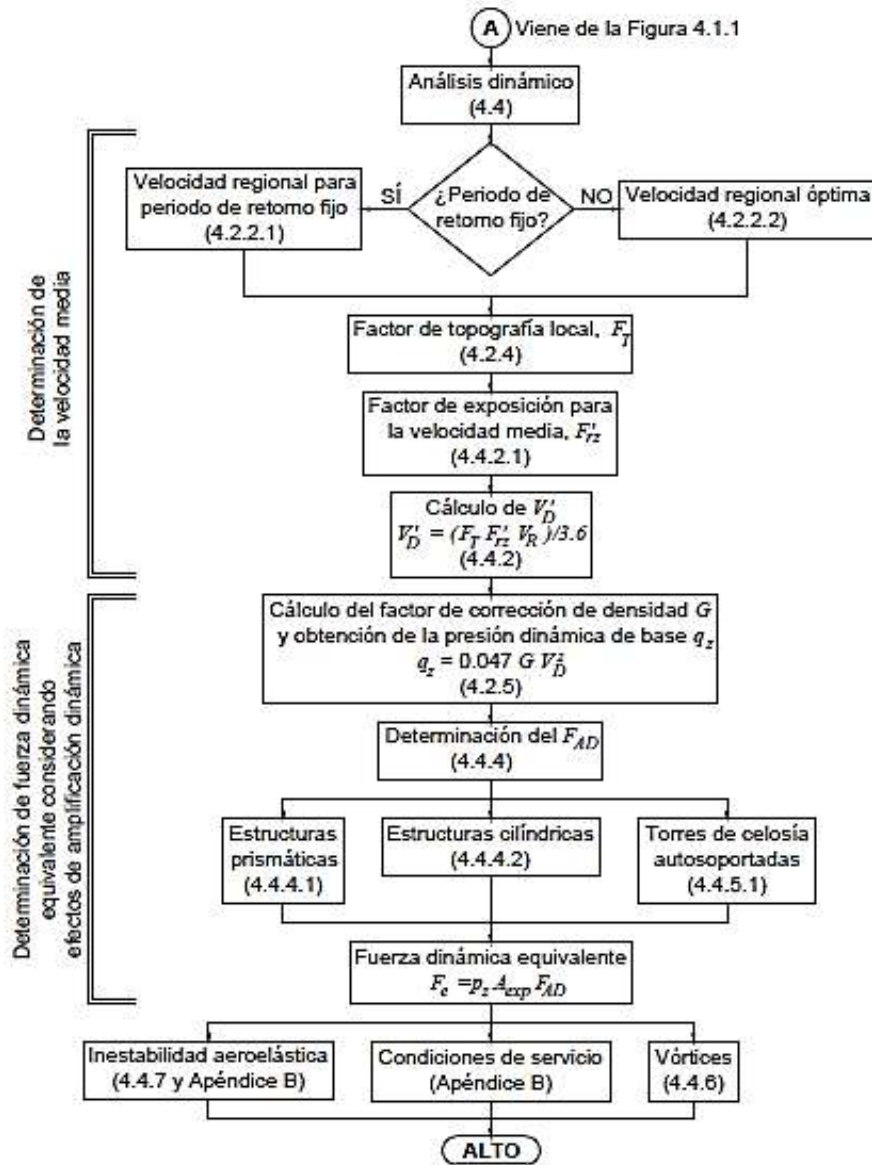
El análisis dinámico es un procedimiento que permite considerar los efectos dinámicos producidos por la turbulencia del viento sobre las estructuras pertenecientes a los Tipos 2 y 3 definidos anteriormente.

Este procedimiento se emplea siempre y cuando el periodo de la estructura sea menor que cinco segundos y, en particular, cumplan las siguientes condiciones:

- La relación de esbeltez  $H/D > 5$ .
- El periodo fundamental de la estructura es mayor que un segundo y menor o igual que cinco segundos.

Al igual que en el análisis estático, el MDOCDV 2008 define un diagrama de flujo del proceso del análisis dinámico, el cual se presenta en la Figura 30.





**Figura 30 Diagrama de flujo para el análisis dinámico (MDOCDV, 2008) Nota: Los números dentro de los paréntesis, figuras y apéndices mostrados corresponden a los del MDOCDV 2008, mas no a los de este trabajo**

El procedimiento es simple, principalmente se enfoca en la determinación de un FAD, el cual será aplicado a las presiones de diseño y por ende se modificarán las fuerzas actuantes debidas a la acción del viento. Las expresiones definidas en el MDOCDV 2008, se basan en códigos internacionales, principalmente en el Eurocódigo, con las modificaciones pertinentes.

### Velocidad media, $V'_D$

El análisis dinámico requiere que la velocidad del viento sea evaluada con un lapso de promediación de diez minutos para determinar el factor de respuesta dinámica. Esta velocidad media se determina con la siguiente expresión:

$$V'_D = \frac{F_T F'_{rz} V_R}{3.6} \quad (2.78)$$

Donde:

$$F'_{rz} = 0.702 \bar{b} \quad \text{si } z \leq 10 \quad (2.79)$$
$$F'_{rz} = 0.702 \bar{b} \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha'} \quad \text{si } 10 < z \leq 200$$

- $F_T$  factor de topografía, adimensional.
- $F'_{rz}$  factor de exposición para la velocidad media.
- $V_R$  velocidad regional de ráfaga, en km/h.
- $z$  altura medida a partir del nivel medio del terreno, en la cual se desea calcular la velocidad media del viento, en m.
- $\alpha'$  exponente de la variación de la velocidad del viento con la altura para cada categoría de rugosidad del terreno, adimensional; corresponde a un intervalo de promediación de diez minutos. Cuando la altura sea mayor que 200 m, se realizarán otros estudios específicos avalados por expertos en la materia.
- $\bar{b}$  coeficiente correctivo del factor de exposición, adimensional.

Los valores de  $\bar{b}$  y  $\alpha'$  se indican en la Tabla 22. El valor de 3.6 es un factor que permite la conversión de unidades de la velocidad regional, de km/h a m/s.

Los factores  $F_T$  y  $F'_{rz}$  corresponderán a las características topográficas y de rugosidad del sitio donde se desplantará la estructura.

**Tabla 22 Valores de  $\bar{b}$  y  $\alpha'$  (MDOCDV, 2008)**

Categoría del terreno	$\bar{b}$	$\alpha'$
1	1.17	0.12
2	1	0.16
3	0.77	0.21
4	0.55	0.29

### Fuerza dinámica equivalente en la dirección del viento, $F_{eq}$

La fuerza dinámica equivalente, para una altura sobre el nivel del terreno,  $z$ , en m, se obtiene con la siguiente expresión:

$$F_{eq}(z) = p_z A_{exp} F_{AD} \quad (2.80)$$

Donde:

$$p_z = C_p q_z \quad (2.81)$$

$A_{exp}$  área expuesta proyectada en un plano perpendicular a la dirección del viento, en  $m^2$ .

$F_{AD}$  factor de amplificación dinámica obtenido para cada estructura en particular, adimensional.

$p_z$  presión actuante, en Pa.

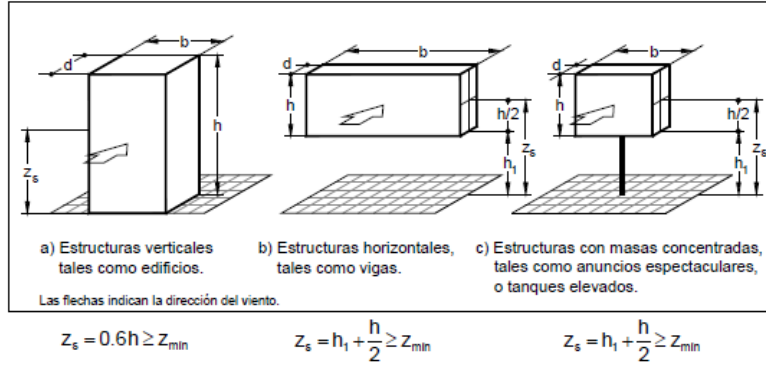
$q_z$  presión dinámica de base a una altura  $z$ , en Pa.

El FAD proporciona la fuerza máxima producida por los efectos de la turbulencia del viento y las características dinámicas de la estructura. Considera dos contribuciones en la respuesta estructural, la parte cuasi-estática o de fondo y la de resonancia.

### Factor de amplificación dinámica para edificios prismáticos, $F_{AD}$

La expresión definida en el MDOCDV 2008, que permite calcular el FAD, solo aplica para estructuras con planta rectangular o a base de rectángulos. De manera general, que tengan la forma que se muestra en la Figura 31.

Este factor que recomienda el MDOCDV 2008 considera principalmente que la estructura tiene una masa uniformemente distribuida con respuesta predominante en su modo fundamental de vibración lineal en flexión.



**Figura 31 Formas generales de estructuras. a) estructuras verticales, b) elementos estructurales y c) anuncios**

Así mismo, solo se puede utilizar cuando la respuesta máxima en la dirección del viento está dada principalmente por la contribución del modo fundamental de vibrar, el cual tendrá signo constante. Por lo tanto, la contribución de los modos de vibrar superiores se considera despreciable.

El FAD, para estas estructuras se define de la siguiente manera:

$$F_{AD} = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 I_v(z_s)} \quad (2.82)$$

Donde:

$$I_v(z_s) = \bar{d} \left( \frac{z_s}{10} \right)^{-\alpha'} \quad \text{si} \quad z_{min} \leq z_s \leq z_{max} \quad (2.83)$$

$$I_v(z_s) = \frac{1}{\ln \left( \frac{z_{min}}{z_0} \right)} \quad \text{si} \quad z_s \leq z_{min}$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.90 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0.63}} \quad (2.84)$$

$$L(z_s) = 300 \left( \frac{z_s}{200} \right)^{\bar{\alpha}} \quad \text{si} \quad z_s \geq z_{min} \quad (2.85)$$

$$L(z_s) = 300 \left( \frac{z_{min}}{200} \right)^{\bar{\alpha}} \quad \text{si} \quad z_s < z_{min}$$

$$R^2 = \frac{\pi}{4 \zeta_{1,x}} S_L R_h R_b \quad (2.86)$$

$$S_L = \frac{6.8 \left( \frac{n_{1,x} L(z_s)}{V_D'(z_s)} \right)}{\left[ 1 + 10.2 \left( \frac{n_{1,x} L(z_s)}{V_D'(z_s)} \right) \right]^{\frac{5}{3}}} \quad (2.87)$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2}(1 - e^{-2\eta_h}) \text{ Para } \eta_h = 0 ; R_h = 1.0 \quad (2.88)$$

$$\eta_h = \frac{4.6 h n_{1,x}}{V_D'(z_s)} \quad (2.89)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2}(1 - e^{-2\eta_b}) \text{ Para } \eta_b = 0 ; R_b = 1.0 \quad (2.90)$$

$$\eta_b = \frac{4.6 b n_{1,x}}{V_D'(z_s)} \quad (2.91)$$

$$k_p = \sqrt{2 \ln(v T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(v T)}} \geq 3.0 \quad (2.92)$$

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0.08 \quad (2.93)$$

Donde:

- $B^2$  factor de respuesta de fondo, que permite tomar en cuenta la falta de correlación de la presión en las superficies de la estructura, adimensional.
- $b$  ancho de la estructura, en m.
- $z_s$  altura de referencia, en m.
- $h$  altura de la estructura, en m.
- $I_v(z_s)$  índice de turbulencia, evaluado a la altura de referencia,  $z_s$ , que representa el nivel o intensidad de turbulencia en el flujo del viento, adimensional.
- $k_p$  factor pico de respuesta máxima, adimensional.
- $L(z_s)$  longitud de escala de turbulencia, que representa el tamaño usual, en promedio, de las ráfagas del viento, en m.
- $n_{1,x}$  frecuencia natural de vibración de la estructura en la dirección del viento, en Hz.
- $R^2$  factor de respuesta en resonancia, que permite tomar en cuenta el efecto de la turbulencia local del viento en resonancia con el modo de vibración de la estructura, adimensional.
- $R_h, R_b$  funciones de admitancia aerodinámica, adimensionales.
- $S_L$  densidad de potencia, que describe la distribución de la turbulencia del viento en un sitio con respecto a intervalos de frecuencias, adimensional.

$V'_D$  velocidad media evaluada a la altura  $z_s$ , en m/s.

$\zeta_{1,x}$  relación de amortiguamiento total, adimensional. Algunos valores de amortiguamiento para distintos materiales se encuentran en la tabla 23.

**Tabla 23 Valores representativos de la relación de amortiguamiento estructural (MDOCDV, 2008)**

Tipo de estructura	$\zeta_{est,x}$
Edificios de concreto reforzado y presforzado	0.015
Edificios de acero	0.010
Estructuras mixtas de concreto y acero	0.013
Chimeneas y torres de concreto reforzado	0.010
Chimeneas de acero soldadas y sin recubrimientos	0.002
Chimeneas de acero soldadas con recubrimiento	0.005
Chimeneas de acero con recubrimiento de refractarios	0.010
Torres de celosía soldadas	0.003
Torres de celosía atornilladas	0.005

Los valores de las constantes:  $\alpha'$  se obtiene de la Tabla 22 y  $\bar{d}$ ,  $z_{min}$  y  $z_0$ , se toman de la Tabla 24; y  $z_{max} = 200$  m.

Los coeficientes  $\eta_b$  y  $\eta_h$  son frecuencias reducidas, adimensionales, función de la frecuencia natural de vibración  $n_{1,x}$ , en la dirección del viento.

**Tabla 24 Valores de las constantes  $\bar{d}$ ,  $z_0$ ,  $z_{min}$  y  $\bar{\alpha}$  (MDOCDV, 2008)**

Categoría del terreno	$\bar{d}$	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]	$\bar{\alpha}$
1	0.15	0.01	1	0.44
2	0.19	0.05	2	0.52
3	0.29	0.3	5	0.61
4	0.43	1	10	0.67

El FAD se puede dividir en dos partes, una correspondiente al factor que amplifica las presiones de diseño y otra que permite una conversión basada en el lapso de promediación.

Dado que el valor de la presión dinámica de base,  $q_z$ , está en función de las velocidades regionales de ráfaga, es decir con un lapso de promediación de 3 segundos, es necesario transformarla a velocidades medias de diez minutos y considerar su fluctuación en la respuesta dinámica.

Algunos códigos internacionales transforman esta presión,  $q_z$ , en efectos medios de diez minutos, utilizando el factor:

$$[1 + 7 I_v(z_s)] \quad (2.94)$$

Donde  $I_v(z_s)$  es el índice de turbulencia del viento en un sitio, calculado con la ecuación 2.83.

Por ello, en ocasiones, se puede llegar a tener la impresión de que el FAD no amplifica las presiones, sino que las reduce, pero lo que ocurre con dicho factor es que transforma las presiones y el factor que amplifica es en realidad el numerador del  $F_{AD}$ , el cual es:

$$\left[ 1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2} \right] \quad (2.95)$$

Donde las variables de dicho factor fueron definidas anteriormente y, aunque su segundo término llegue a ser despreciable, seguirá siendo igual a la unidad, por lo que, no habrá reducción alguna.

Por último, para consultar mayor información con respecto al diseño de estructuras ante la acción del viento que no tengan forma prismática o relacionada con la inestabilidad aeroelástica, se puede consultar el Tomo de Recomendaciones del MDOCDV 2008.

### **Capítulo 3 COMPARACIÓN DE LAS NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR VIENTO**

Las modificaciones a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento fueron publicadas oficialmente a mediados del mes de diciembre del 2017, por lo que deben ser revisadas y analizadas debido a que las expresiones de diseño se modificaron.

La edición actual de la NTCDV es basada en las especificaciones del Eurocódigo, por lo tanto, actualmente tanto la NTCDV 2017 y el MDOCDV 2008, presentan expresiones similares para el diseño de estructuras ante la acción del viento. Es posible afirmar que dicha norma es un extracto del MDOCDV 2008, por lo menos en las dos metodologías de diseño: el método estático y el método dinámico.

En este capítulo, se presentan los cambios realizados a las normas, desde la modificación de la estructura del texto como en las expresiones y especificaciones de diseño, así mismo, se realizará una comparación de los factores que permiten calcular la respuesta dinámica con la finalidad de evaluar la magnitud de los cambios.

#### **3.1 Principales cambios de la NTCDV (2017) con respecto a la NTCDV (2004)**

##### **Estructura del texto**

Como primera evidencia de las modificaciones a las normas, se encuentra la estructura del texto, es decir, la presentación de las normas al lector. La NTCDV 2004, presentaba una configuración del texto a dos columnas, misma que permitía la optimización de espacio y ahorro de hojas cuando se requiere la impresión del documento. Actualmente, la nueva NTCDV 2017, se presenta con una configuración a una sola columna que generaron un aumento de 7 páginas en total. Este cambio en la estructura del texto no fue contemplada previo a su publicación oficial, con lo que se infiere, fue ocasionado por un error humano a cargo del responsable del manejo de la información, ya que la versión propuesta inicialmente fue continuar con la presentación a dos columnas. Más adelante se mostrará un conjunto de evidencias que verifican lo anterior; un posible error humano y mal manejo de la información. En la Figura 32 se muestra la diferencia de la estructura del texto de las dos versiones de las NTCDV (2004 y 2017).



ÍNDICE		CONTENIDO DE LOS TÍTULOS	
1. OBJETIVO	1.1	1. OBJETIVO	1.1
2. CRITERIOS DE DISEÑO	2.1	2. CRITERIOS DE DISEÑO	2.1
2.1 Consideraciones Generales	2.1.1	2.1 Consideraciones generales	2.1.1
2.2 Clasificación de las estructuras	2.2.1	2.2 Clasificación de las estructuras	2.2.1
2.2.1 De acuerdo a su importancia	2.2.1.1	2.2.1 De acuerdo a su importancia	2.2.1.1
2.2.2 De acuerdo con su respuesta ante la acción del viento	2.2.2.1	2.2.2 De acuerdo con su respuesta ante la acción del viento	2.2.2.1
2.2.3 Efectos a considerar	2.2.3.1	2.2.3 Efectos a considerar	2.2.3.1
2.4 Estudio en túnel de viento	2.4.1	2.3 Estudios en túnel de viento	2.3.1
2.5 Precauciones durante la construcción y en estructuras provisionales	2.5.1	2.4 Precauciones durante la construcción y en estructuras provisionales	2.4.1

Figura 32 Vista general de la estructura del texto de la NTCDV 2004 (izq) y de la NTCDV 2017 (der)

Dentro del índice de la NTCDV 2004, es posible apreciar algunas omisiones en cuanto a la numeración de los capítulos, una de ellas es en el Capítulo 2 referente a los criterios de diseño, donde se omite el subcapítulo 2.3, el cual no contiene ninguna información, ya que únicamente la numeración no es continua, detalle que fue corregido en la nueva norma (figura 33). Debido a esta falta de continuidad, la numeración de las figuras y tablas contenidas en el documento no correspondían al capítulo que las contiene. Por ejemplo, las tablas que especifican las velocidades regionales se encuentran contenidas en el subcapítulo 3.1.1, de ambas ediciones de las NTCDV (2004 y 2017); sin embargo, en la NTCDV 2004 la tabla está indicada con la numeración 3.1. Por lo tanto, una de las modificaciones fue ajustar dicha numeración al capítulo correspondiente (figura 34). Además, el cambio fue aplicado a las demás figuras y tablas, así como a las ecuaciones de todo el documento.

2. CRITERIOS DE DISEÑO.....	2. CRITERIOS DE DISEÑO.....3
2.1 Consideraciones Generales.....	2.1 Consideraciones generales.....3
2.2 Clasificación de las estructuras.....	2.2 Clasificación de las estructuras.....3
2.2.1 De acuerdo a su importancia.....	2.2.1 De acuerdo a su importancia.....3
2.2.2 De acuerdo con su respuesta ante la acción del viento.....	2.2.2 De acuerdo con su respuesta ante la acción del viento.....3
2.2.3 Efectos a considerar.....	2.2.3 Efectos a considerar.....4
2.4 Estudio en túnel de viento.....	2.3 Estudios en túnel de viento.....4
2.5 Precauciones durante la construcción y en estructuras provisionales.....	2.4 Precauciones durante la construcción y en estructuras provisionales.....5

Figura 33 Numeración de los subcapítulos corregida. NTCDV 2004 (izq) y NTCDV 2017 (der)

Tabla 3.1 Velocidades regionales, $V_R$ , según la importancia de la construcción y la zonificación eólica, m/s				Tabla 3.1.1 Velocidades regionales, $V_R$ , según la importancia de la construcción y la zonificación eólica, m/s			
Periodo de retorno, años	Importancia de la construcción			Periodo de retorno, años	Importancia de la construcción		
	A	B	Temporal		A	B	Temporal
	200	50	10		200	50	10
Zona I: Delegaciones de Alvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, G.A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza	39	36	31	Zona I: Delegaciones de Azcapotzalco, y G. A. Madero	28	25	19
Zona II: Delegaciones de Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco	35	32	28	Zona II: Delegaciones de Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Coyoacán, Iztacalco, e Iztapalapa	33	30	23
				Zona III: Delegaciones de Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Milpa Alta, Tláhuac, y Xochimilco	39	35	27

**Figura 34 Comparación de dos tablas idénticas. Numeración original NTCDV 2004 (izq) y numeración corregida NTCDV 2017 (der)**

Otro detalle, con respecto al contenido del índice, es en el Capítulo 5 correspondiente a los empujes dinámicos paralelos al viento, donde se aprecia que no existe un desglose de la información (figura 35). La razón por la que probablemente no consideraron incluir subcapítulos en la NTCDV 2004, es porque todas las expresiones y especificaciones de diseño se encuentran enlistadas, mientras que, en la nueva versión de las NTCDV se muestran de igual manera que en el MDOCDV 2008, con un subcapítulo por cada factor o especificación de diseño.

5. EMPUJES DINÁMICOS PARALELOS AL VIENTO .....	5. EMPUJES DINÁMICOS PARALELOS AL VIENTO .....	12
6. EFECTO DE VÓRTICES PERIÓDICOS SOBRE ESTRUCTURAS PRISMÁTICAS .....	5.1 Velocidad media del viento para efectos dinámicos .....	13
6.1 Vibraciones generadas.....	5.1.1 Factor de variación con la altura.....	13
6.2 Vibraciones locales.....	5.1.2 Factor correctivo por topografía y rugosidad.....	13
6.3 Omisión de efectos dinámicos de vorticidad.....	5.2 Estructuras de forma prismática.....	13
7. DESPLAZAMIENTOS PERMISIBLES .....	5.3 Estructuras de forma cilíndrica.....	14
	5.4 Estructuras de celosía para torres autosoportadas.....	15
	5.5 Relación de amortiguamiento estructural .....	16
	5.6 Limitación de efectos dinámicos.....	16

**Figura 35 Comparación de los índices de las NTCDV. NTCDV 2004 (izq) y NTCDV 2017 (der)**

## Estudios en túnel de viento

Este apartado, referente a los estudios en túnel de viento que se deberán realizar siempre y cuando se cumplan con las especificaciones ahí mencionadas, en la edición del 2004, no hay mucha información al respecto, es decir, únicamente se especificaba el uso de pruebas en túnel de viento cuando una estructura no cuenta con una geometría común o por las características dinámicas de la estructura.

Actualmente, la NTCDV 2017, además de la información que se tenía con relación al uso de pruebas en túnel de viento, se cuenta con un conjunto de especificaciones sobre modelos a escala según el Tipo de estructura. Para cada Tipo de estructura se establece un procedimiento de ejecución e interpretación de resultados (tabla 25).

**Tabla 25 Requisitos de ejecución e interpretación de resultados de pruebas en túnel de viento según la clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento**

Tipo	Modelo	Objetivos
1	Rígido	Se instrumentará el modelo con sensores de presión y se colocará en una base instrumentada. La finalidad de la prueba es obtener isobaras representativas de la acción del viento para diversos ángulos de ataque, así como, conocer las acciones que el viento produce en la base de la construcción
2	Aeroelástico	Las propiedades dinámicas deben ser similares al del prototipo. El perfil de velocidades del sitio y las construcciones vecinas serán representados en las pruebas. El objetivo de la prueba es identificar la respuesta inducida por el viento turbulento, la severidad de la acción dinámica del viento y las cargas dinámicas en diversas direcciones
3	Aeroelástico	Las propiedades dinámicas deben ser similares al del prototipo. El modelo se instrumentará con sensores que permitan estimar la magnitud de los desplazamientos en dos direcciones ortogonales ante diversos ángulos de ataque. El objetivo de la prueba es conocer el número de Strouhal asociado al modelo y conocer la velocidad crítica del viento
4	Aeroelástico	El modelo deberá reproducir los detalles exteriores de la construcción, distribución de masas y rigideces, niveles de amortiguamiento esperados y la similitud entre los tres primeros modos de vibrar del prototipo. El objetivo será identificar los procesos inestables que se producen por la interacción viento-estructura y definir velocidades críticas

### Zonificación eólica

Las velocidades regionales, en la NTCDV 2004, son clasificadas en dos zonas: Zona I y Zona II. Cada zona contiene a las delegaciones de la Ciudad de México, actualmente denominadas alcaldías, donde las velocidades regionales son aproximadamente las mismas. Se puede apreciar en la Figura 34, que la alcaldía Tláhuac no se encuentra contenida en la zonificación.

En la NTCDV 2017, la zonificación eólica se divide en tres zonas: Zona I, Zona II y Zona III. Solo dos al se mantuvieron en la Zona I, con una reducción notable en los valores de la velocidad regional, por ejemplo, para las estructuras del Grupo A dentro de la Zona I, el valor máximo es de 39 m/s en la edición del 2004, mientras que, en la actual edición, el valor es de 28 m/s. En la Zona II, se encuentran ocho alcaldías con respecto a las cinco de la edición anterior, en el caso de la magnitud de las velocidades, al igual que en la Zona I, hubo una reducción de la velocidad regional que, para este caso, fue del orden de 2 a 5 m/s.

La Zona III eólica, fue añadida como parte de las modificaciones a las normas técnicas para diseño por viento, en ella se encuentran la mayoría de las alcaldías que antes estuvieron dentro de la Zona II, con el detalle de que ahora la alcaldía Tláhuac fue añadida.

### Coefficientes de presión

Los cambios efectuados en este capítulo, son referentes a los valores de los coeficientes de presión para techos inclinados del lado de barlovento y los techos curvos. Para este tipo de techos, los valores de los coeficientes de presión, dependen de su grado de inclinación. En el caso de techos inclinados del lado de barlovento, ahora se tienen dos condiciones, las cuales son:

$$-1.0 \quad \text{para } 0^\circ < \theta < 20^\circ$$

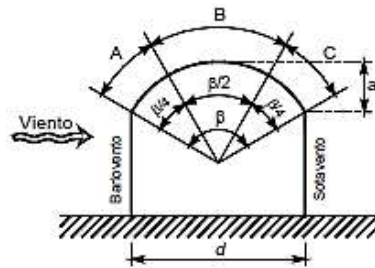
$$-1.0 < [0.05 \theta - 2.0] < 0.5 \quad \text{para } 20^\circ < \theta < 50^\circ$$

En la edición anterior de la norma, solo se mostraba una expresión que no especificaba el grado de inclinación necesario, ya que servía para cualquier ángulo de inclinación, algo que las nuevas normas ya lo especifican, además de que se definió un ángulo límite para el tipo de techos.

La otra modificación fue en las especificaciones para determinar el coeficiente de presión para techos curvos, mismo que requiere de una figura como referencia y una tabla con las características de la cubierta en arco (figura 36).

Relación $r = a/d$	A	B	C
$r < 0.2$	-0.9	—	—
$0.2 < r < 0.3$	$3r - 1$	$-0.7 - r$	-0.5
$r > 0.3$	$1.42r$	—	—

<sup>1</sup> Para cubiertas de arco apoyadas directamente sobre el suelo, el coeficiente de presión sobre la zona A deberá tomarse igual a  $1.4r$ , para todo valor de  $r$ .



**Figura 36** Tabla y figura de apoyo para determinar el valor del coeficiente de presión para cubiertas en arco (NTCDV, 2004)

Las zonas B y C de la Figura 36, para la relación  $r < 0.2$  y  $r > 0.3$ , no presentan valores propuestos; sin embargo en la NTCDV 2017, se proponen algunos valores para las zonas de la cubierta en arco antes mencionadas. En adición, un nuevo tipo de cubierta fue agregado y corresponde a una cubierta apoyada en el terreno y no únicamente elevada, como se había manejado (tabla 26).

**Tabla 26** Cambios en los coeficientes de presión para cubiertas en arcos (NTCDV, 2017)

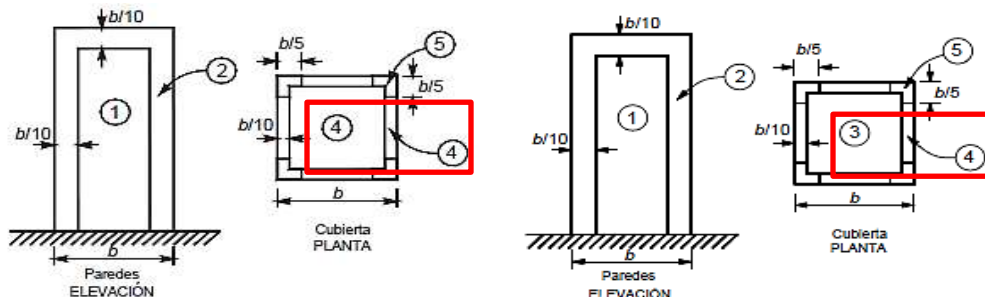
Tipo de cubierta	$r = a/d$	Zona		
		A	B	C
En estructura elevada	$0 < r < 0.2$	-0.9	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.2 \leq r \leq 0.3$	$(1.5r - 0.3)^*$	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.3 < r \leq 0.6$	$2.75r - 0.68$	$-0.7 - r$	-0.5
Apoyada en el terreno	$0 < r \leq 0.6$	$1.42r$	$-0.7 - r$	-0.5

\*Cuando  $0.2 \leq r \leq 0.3$ , se deberá revisar también con el coeficiente alterno  $(6r - 2.1)$

## Diseño de elementos de recubrimientos

La NTCDV establece un conjunto de tablas con especificaciones para calcular el coeficiente de presión asociado a los elementos de recubrimiento de las construcciones y, se dividen en dos partes, una para construcciones menores de 20 metros de altura y otra para aquellas que tengan 20 o más metros de altura. Junto con las tablas, se presenta un diagrama que muestra cinco zonas numeradas donde será contemplado el recubrimiento, de tal manera que, se pueda seleccionar el coeficiente de presión adecuado.

En la edición del 2004, el diagrama presentaba un error al referenciar una de las zonas de recubrimiento, ya que, si se requería seleccionar la zona 3, no era posible conocer el coeficiente de presión asociado y era necesario inferir la opción correcta. Por lo que, en la edición actual de la NTCDV 2017, el diagrama fue corregido para evitar confusión en la selección del coeficiente (figura 37).



**Figura 37 Corrección del diagrama de referencia para el diseño de elementos de recubrimiento. NTCDV 2004 (izq) y NTCDV 2017 (der)**

## Empujes dinámicos paralelos al viento

El cambio más significativo de la NTCDV 2004, fue el cálculo del FAD, al modificar por completo el procedimiento en el cual se considera el efecto dinámico. Anteriormente, era posible determinar ciertos factores como el factor de excitación de fondo y la relación de energía en ráfaga, de manera gráfica. Sin embargo, en la NTCDV 2017, el procedimiento de cálculo es más extenso que el anterior, además de que no se proponen gráficas para determinar factores de manera más práctica.

En esta versión, se optó por separar el factor de efectos dinámicos en dos partes: el numerador y el denominador. El numerador corresponde al factor de efectos dinámicos al ser la expresión que amplifica el valor de las presiones, ya que consta de dos sumandos, donde uno de ellos es la unidad y el otro está compuesto por los factores que contemplan los efectos dinámicos del viento, por lo que, si por cualquier motivo, el segundo sumando resulta cero, el factor de efectos dinámicos nunca será menor que la unidad.

En el caso del denominador, este será aplicado a las presiones de diseño directamente a manera de un factor adicional, de tal manera que, al multiplicarlo por el factor de efectos dinámicos, sea posible identificar el incremento de las presiones. Esta expresión es un factor que permite

transformar la presión, que esta evaluada con un lapso de promediación de 3 segundos, a una presión con un lapso de promediación de diez minutos. Cabe aclarar que, el valor de la presión no es la que se promedia, es la velocidad, pero debido a que la presión está en función de la velocidad, es posible mencionarla en términos del lapso de promediación.

Otro aspecto que fue tomado en cuenta en las modificaciones fue el hecho de considerar el límite de altura de las estructuras, mismas que no pueden exceder los 200 metros de altura, sobrepasando ese valor, es necesario recurrir a pruebas en túnel de viento. En la edición anterior de las normas, con sus especificaciones correspondientes, la altura máxima era de 450 metros.

Como parte de los errores y omisiones que presenta la NTCDV 2017, se encuentra el uso de imágenes pegadas dentro del documento para mostrar una variable, en lugar de generadas por algún software de texto. En las Figuras 38 y 39, los títulos de las tablas mostradas carecen de un parámetro y se muestran unas variables que no fueron generadas, sino recortadas de otro documento y pegadas en la tabla, esto es evidenciado por la falta de nitidez de la variable cuando se realiza un acercamiento.

**Tabla 5.0.1** Parámetros  $Z_0$ ,  $Z_{min}$  y  $\alpha'$  según la condición de exposición

Exposición	$\bar{d}$	$Z_0$ (m)	$Z_{min}$ (m)	$\alpha'$
R1	0.15	0.01	1	0.12
R2	0.19	0.05	2	0.16
R3	0.29	0.30	5	0.21
R4	0.43	1.0	10	0.29

Figura 38 Errores y omisiones presentes en la tabla 5.0.1 de la (NTCDV, 2017)

**Tabla 5.2.1** Factor  $\bar{\alpha}$

Tipos de terreno (Fig. 3.1 y tabla 3.2)		$\bar{\alpha}$
R1		0.44
R2		0.52
R3		0.61
R4		0.67

Figura 39 Errores y omisiones presentes en la tabla 5.2.1 de la (NTCDV, 2017)

Así como se ha evidenciado anteriormente, la NTCDV 2017 presenta varias omisiones y detalles que no fueron contemplados previo a su publicación, pero dentro del capítulo de empujes dinámicos paralelos al viento, existe una omisión importante que no permite realizar completamente el cálculo del factor de efectos dinámicos.

Todas las ecuaciones que permiten calcular el factor de efectos dinámicos, se van enlistando a lo largo del documento y en el orden en el que una ecuación requiere de otra hasta llegar al punto donde se han definido todas las ecuaciones necesarias. Pero hay un límite en el documento donde, se hace referencia a los parámetros de admitancia aerodinámica mismos que, a su vez, están en función de frecuencias reducidas.

Los parámetros de admitancia aerodinámica están definidos por las ecuaciones 5.2.5 y 5.2.6 según la numeración de la NTCDV 2017. Seguido de éstas ecuaciones, se esperaba que se definieran las ecuaciones de las frecuencias reducidas,  $\eta_h$  y  $\eta_b$ , pero inmediatamente después, se presenta un nuevo capítulo referente al cálculo del factor de efectos dinámicos para estructuras de forma cilíndrica (figura 40). Por lo tanto, no es posible determinar el factor de efectos dinámicos para estructuras de forma prismática.

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2}(1 - e^{-2\eta_h}); \quad (5.2.5)$$

$$R_h = 1.0 \text{ para } h_h = 0$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2}(1 - e^{-2\eta_b}); \quad (5.2.6)$$

$$R_b = 1.0 \text{ para } h_b = 0$$

**5.3 Estructuras de forma cilíndrica**

En la figura 5.3.1 se presenta una estructura cilíndrica indicándose la altura de referencia para la cual se calcula el factor de efectos dinámicos. Asimismo, en la misma figura se indican las dimensiones de D y h para este caso y sus unidades están dadas en m. El factor de efectos dinámicos se calcula con la ecuación 5.0.1, pero considerando los parámetros correspondientes que se definen en este apartado.

**Figura 40 Omisión de dos expresiones para determinar las frecuencias reducidas  $\eta_h$  y  $\eta_b$  (NTCDV, 2017)**

En la Figura 40, además de las ecuaciones faltantes, las frecuencias reducidas están representadas por la letra “h” erróneamente, dado que es una variable no definida en las normas; la representación adecuada de las frecuencias reducidas, es la letra griega “ $\eta$ ” con el subíndice correspondiente. Aunque se conoce que la actualización original sí contempló la definición de las ecuaciones faltantes, es indispensable dar a conocer las omisiones causadas por la edición del documento final.

### Modificaciones adicionales

En los demás capítulos de la NTCDV 2017, solo se presentan dos cambios más con respecto a la NTCDV 2004. Uno de ellos es la adición de un apartado donde se especifica que el límite de la aceleración debida a los empujes dinámicos no debe sobrepasar 0.02 de la aceleración de la gravedad. El último cambio se presenta en el Capítulo 6.3 de la NTCDV 2017, donde se establece que algunas omisiones son posibles realizar con respecto a las vibraciones generadas y vibraciones locales y, dado que, se modificó el procedimiento de cálculo para contemplar los efectos dinámicos del viento, una de las omisiones que se pueden realizar se relaciona con la velocidad media para efectos dinámicos, donde la condición es la siguiente:

$$V_D' < 0.8 V_{cr} \quad (3.1)$$

Siempre que la velocidad media sea menor que el 20% de la velocidad crítica, es posible omitir los efectos dinámicos de vorticidad.

Los capítulos siguientes de este trabajo, corresponden al análisis técnico de los cambios efectuados a la NTCDV 2004.



### 3.2 Comparación de los factores para el cálculo de la respuesta dinámica de la NTCDV (2017) con respecto a la NTCDV (2004)

Como parte del análisis de los cambios realizados a la NTCDV 2004, está la comparación de los factores para el cálculo de la respuesta dinámica. El factor principal de comparación, es la presión afectada por el FAD, ya que contempla la contribución de todos los factores involucrados en la respuesta dinámica de las estructuras, pero para fines de este trabajo, se realizará un análisis de los factores que son equivalentes entre las NTCDV 2004 y 2017. Como información adicional de comparación y como herramienta de calibración para la NTCDV 2017, se empleará el MDOCDV 2008.

Se estableció una base de datos de edificios con sus respectivas características y propiedades mecánicas. Cada edificio fue seleccionado, de tal manera que fuera posible utilizar el método dinámico, por lo tanto, en total se tienen 10 edificios con características dinámicas similares como lo es la frecuencia de vibrar mayor a 0.5 segundos en ambas direcciones, de modo que, el periodo fundamental de vibración resulte mayor a la unidad (tabla 27).

**Tabla 27 Base de datos de edificios**

Edificio	Altura	Base	Ancho	Frecuencia		Periodo		$\xi$
	H [m]	b [m]	ML [m]	b [Hz]	ML [Hz]	b [s]	ML [s]	
1	381	129.54	60.05	0.120	0.120	8.333	8.333	0.01
2	131.06	51.21	34.14	0.254	0.224	3.937	4.464	0.01
3	45.72	40.54	69.8	0.709	0.704	1.410	1.420	0.02
4	45.72	44.2	47.55	0.763	0.763	1.311	1.311	0.02
5	45.72	49.38	63.09	0.870	0.787	1.149	1.271	0.02
6	45.72	48.77	71.92	0.769	0.541	1.300	1.848	0.02
7	45.72	48.77	51.21	0.752	0.625	1.330	1.600	0.02
8	103.02	76.5	89.92	0.667	0.513	1.499	1.949	0.01
9	53.04	72.54	73.15	1.020	1.099	0.980	0.910	0.02
10	45.72	56.69	83.82	0.602	0.671	1.661	1.490	0.02



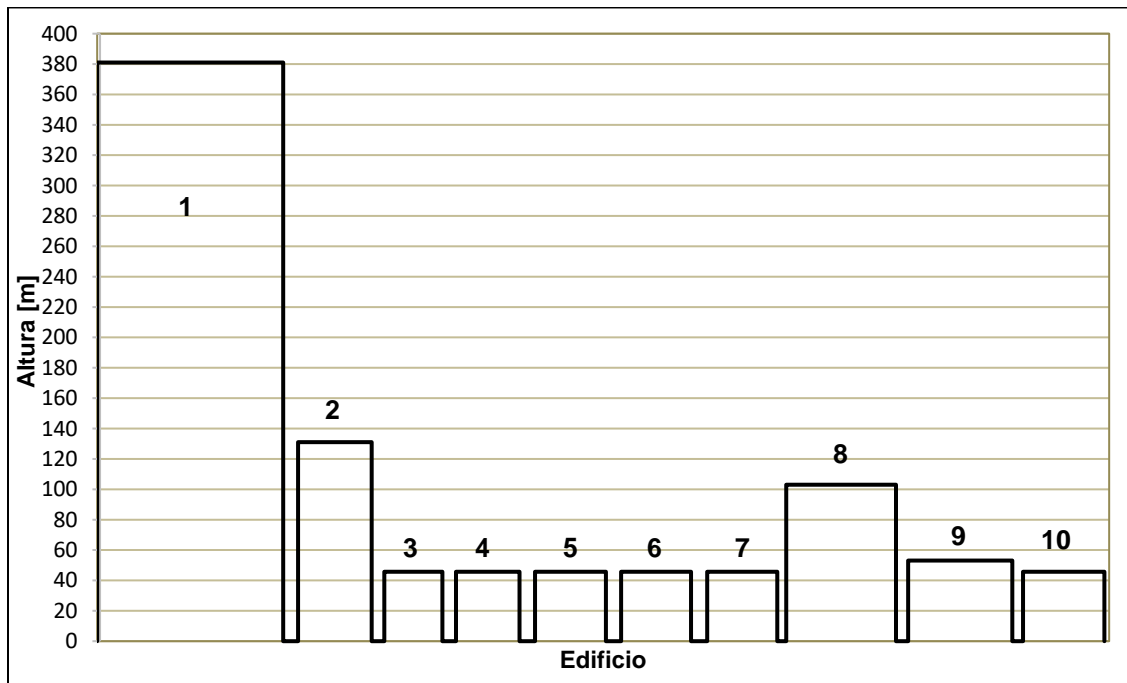


Figura 41 Altura de edificios

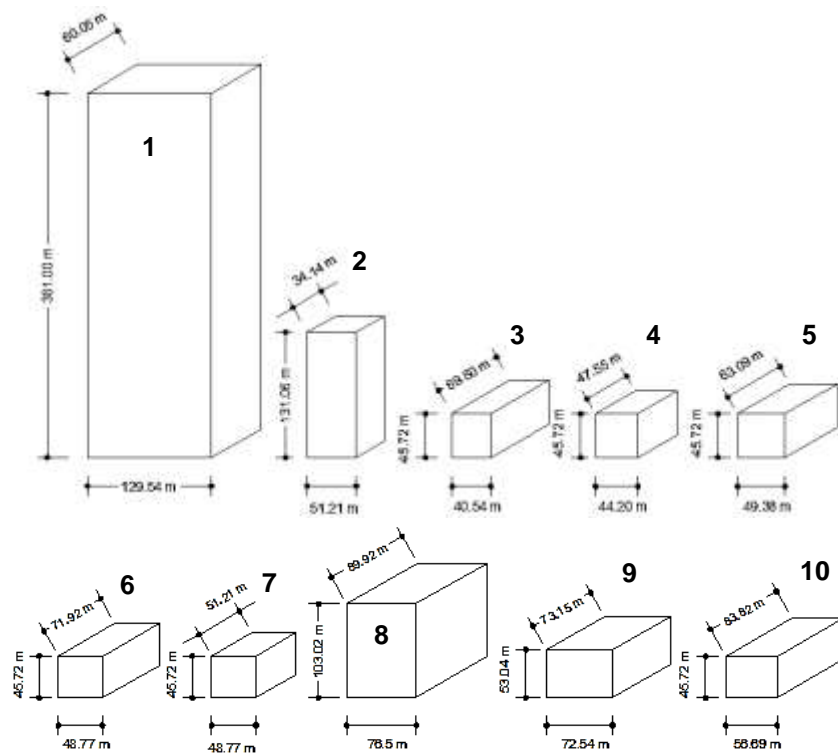


Figura 42 Isométrico de la base de datos de edificios

Una vez definidas las características de los edificios a analizar, es necesario establecer las condiciones del entorno donde, hipotéticamente, serán desplantados. Las condiciones del entorno, para cada normativa, son las que se muestran en la Tabla 28.

**Tabla 28 Características de entorno de desplante de los edificios**

Descripción	Normativa		
	NTC 2004	NTC 2017	CFE 2008
<b>Ubicación</b>	Reforma, Del. Cuauhtemoc	Reforma, Del. Cuauhtemoc	Reforma, Del. Cuauhtemoc
<b>Clasificación</b>	B	B	B
<b>Zona Eólica</b>	I	II	Ver mapa de Isotacas
<b>Velocidad Regional</b>	36 m/s	36 m/s	36 m/s
<b>Categoría del Terreno</b>	R4	R4	4
<b>Tipo de Topografía</b>	T3	T3	Normales
<b>Construcción</b>	Cerrada	Cerrada	Cerrada

Para fines prácticos y, dado que son 10 edificios por analizar, se elaboró un código en Matlab con las ecuaciones, características de los edificios y del entorno, para desarrollar tanto el método estático como el dinámico en las distintas ediciones de las NTCDV. Este código se muestra a continuación.

#### Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento 2004

```

%-----DATOS GENERALES DEL ENTORNO-----
% UBICACIÓN: Reforma, Delegación Cuauhtemoc
% CLASIFICACIÓN: Grupo B (Sección 4.1.3)
% ZONA EÓLICA: Zona I (Tabla 3.1.1)
% CATEGORÍA DEL TERRRENO SEGUN RUGOSIDAD: R4 (Tabla 3.2)
% TIPO DE TOPOGRAFÍA: T3 (Tabla 3.3)
% CONSTRUCCIÓN CERRADA
% H=altura del edificio; z=H; n0=frecuencia natural de vibración del edificio
% beta=coeficiente de amortiguamiento del edificio

% NOTA: Las referencias presentes en este código corresponden al documento oficial
de la NTCDV 2004 y no a los de este trabajo.

%-----ANÁLISIS ESTÁTICO-----
% Cálculo de la velocidad de diseño
Vr=36; %Velocidad regional (Tabla 3.1)
alpha=0.170; delta=455; FTR=0.82; % Factores para el cálculo del factor de
variación con la altura (Tablas 3.2 y 3.3)

% Factor de variación con la altura
if z<=10
    Fa=1;
elseif (10<z)&&(z<delta)
    Fa=(z/10)^alpha;

```

```

elseif z>=delta
    Fa=(delta/10)^alpha;
end

Vd=FTR*Fa*Vr;

% Coeficientes de presión
Cpb=0.8; Cps=0.4; % (Tabla 3.4)
Cp=Cpb+Cps;

% Presión de diseño
pz=0.048*Cp*(Vd^2);

%-----ANÁLISIS DINÁMICO-----
% Factor de excitación de fondo
Bx=@(x) (4/3) * (1./ (1+ ((x*H) ./457))) .* (1./ (1+ ((x*b) ./122))) .*...
    (x./ ((1+x.^2) .^(4/3)));
B=integral(Bx,0, (914/H));

% Factor correctivo por exposición
a=33; n=0.72; %
Ce=(z/a)^n;

% Velocidad de diseño a la altura "H"
R=0.34;
VH=Vr* ((R*Ce)^(1/2));

% Factor reductivo por tamaño
S=(pi/3) * (1/ (1+ ((8*n0*H) / (3*VH)))) * (1/ (1+ ((10*n0*b) / (VH))));

% Inverso de la longitud de onda
x0=(1220*n0) /VH;

% Función relacionada con la distribución de la energía del viento
F=(x0^2) / ((1+x0^2)^(4/3));

% Tasa media de fluctuación
v=n0* ((S*F) / ((S*F) + (beta*B)))^(1/2);

% Factor de respuesta máxima
g=(1/2.3) * (((2*log(3600*v))^(1/2)) + (0.58/ (2*log(3600*v))^(1/2)));

% Factor de amplificación dinámica
FAD=0.43+g* ((R/Ce) * (B+ (S*F) /beta))^(1/2);

% Presión dinámica amplificada
Pz=pz*G;

```

## Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento 2017

```
%-----DATOS GENERALES DEL ENTORNO-----
% UBICACIÓN: Reforma, Delegación Cuauhtemoc
% CLASIFICACIÓN: Grupo B (Sección 4.1.3)
% ZONA EÓLICA: Zona II (Tabla 3.1.1)
% CATEGORÍA DEL TERRRENO SEGUN RUGOSIDAD: R4 (Tabla 3.2)
% TIPO DE TOPOGRAFÍA: T3 (Tabla 3.3)
% CONSTRUCCIÓN CERRADA
% h=altura del edificio; z=h; n0=frecuencia natural de vibración del edificio
% amort=coeficiente de amortiguamiento del edificio

% NOTA: Las referencias presentes en este código corresponden al documento oficial
de la NTCDV 2017 y no a los de este trabajo.

%-----ANÁLISIS ESTÁTICO-----
% Cálculo de la velocidad de diseño
Vr=36; % Velocidad regional (Tabla 3.1.1)
alpha=0.170; delta=455; FTR=0.82; % Factores para el cálculo del factor de
variación con la altura (Tablas 3.1.2 y
3.1.3)

% Factor de variación con la altura
if z<=10
    Fa=1;
elseif (10<z)&&(z<delta)
    Fa=(z/10)^alpha;
elseif z>=delta
    Fa=(delta/10)^alpha;
end

Vd=FTR*Fa*Vr;

% Coeficientes de presión
Cpb=0.8; Cps=0.4; % (Tabla 3.3.1)
Cp=Cpb+Cps;

%Presión de diseño
pz=0.048*Cp*(Vd^2);

%-----ANÁLISIS DINÁMICO-----
% Cálculo de la velocidad media del viento para efectos dinámicos
alpha_p=0.29; FTR_p=0.55; % Factores para el cálculo de factor de variación
con la altura (Tablas 5.0.1 y 5.1.1)

% Factor de variación con la altura para efectos dinámicos
if z<=10
    Fa_p=0.702;
elseif (10<z)&&(z<200)
    Fa_p=0.702*((z/10)^alpha_p);
end

Vd_p=FTR_p*Fa_p*Vr;
```

```

% Velocidad media evaluada a la altura de referencia "zs"
zs=0.6*h;

if zs<=10
    Fa_pzs=0.702;
elseif (10<zs)&&(zs<200)
    Fa_pzs=0.702*(zs/10)^alpha_p;
end

Vd_pzs=FTR_p*Fa_pzs*Vr;

% Longitud de escala de turbulencia a la altura de referencia "zs"
alpha_bit=0.67; zmin=10; % Factores para el cálculo de la longitud de escala de
                        turbulencia (Tablas 5.2.1 y 5.0.1)

if zs>=zmin
    Lzs=300*(zs/200)^alpha_bit;
elseif zs<zmin
    Lzs=300*(zmin/200)^alpha_bit;
end

% Índice de turbulencia a una altura de referencia "zs"
d_bit=0.43; z0=1; % Factores para el cálculo del índice de turbulencia (Tabla
                    5.0.1)

if (zmin<zs)&&(zs<=200)
    Izs=d_bit*(zs/10)^(-alpha_p);
elseif zs<=zmin
    Izs=1/(log(zmin/z0));
end

% Espectro de potencia del viento
SL=(6.8*((n0*Lzs)/(Vd_pzs)))/((1+10.2*((n0*Lzs)/(Vd_pzs))^(5/3)));

% Parámetros de admitancia aerodinámica
nh=(4.6*h*n0)/(Vd_pzs); nb=(4.6*b*n0)/(Vd_pzs);

if nh==0
    Rh=1;
else
    Rh=(1/nh)-(1/(2*nh^2))*(1-exp(-2*nh));
end
if nb==0
    Rb=1;
else
    Rb=(1/nb)-(1/(2*nb^2))*(1-exp(-2*nb));
end

% Factores de respuesta por turbulencia de fondo "B2" y por resonancia "R2"
B2=1/(1+0.90*((b+h)/Lzs)^0.63);
R2=(pi/(4*amort))*SL*Rh*Rb;

```

```

% Tasa media de fluctuación
v=n0* ((R2/(B2+R2))^(1/2));

% Factor pico de respuesta máxima
g=((2*log(600*v))^(1/2))+0.6/((2*log(600*v))^(1/2));

% Factor de efectos dinámicos por ráfagas evaluado a la altura "zs"
G=1+2*g*Izs*((B2+R2)^(1/2));

% Factor de amplificación dinámica
Factor=(1/(1+7*Izs)); % Factor transformante
FAD=G*Factor;

% Presión de diseño transformada en términos del lapso de promediación de 10 minutos
Pz=pz*Factor;

% Presión de diseño amplificada
Pzd=Pz*G;

```

Los códigos anteriores se ejecutaron con cada edificio, de este modo, se obtuvieron todos los parámetros correspondientes para su comparación, donde algunos de ellos no son comparables de manera directa, por lo que se ajustaron para lograr dicho objetivo.

Los factores que fueron analizados y los que fueron ajustados para su comparación, se listan a continuación:

- $F_{\alpha}$ , factor de variación del viento con la altura.
- $p_z$ , presión de diseño estática.
- $V_D$ , velocidad de diseño estática.
- $g, k_p$ , factor pico de respuesta máxima.
- $v$ , tasa de fluctuación media.
- $F'_{\alpha}$ , factor de variación del viento con la altura, para efectos dinámicos.
- $V'_D$ , velocidad media para efectos dinámicos.
- $B$ , factor de respuesta de fondo.
- $R$ , factor de respuesta en resonancia.
- $F_{AD}$ , factor de amplificación dinámica o factor de efectos dinámicos.
- $p_z * F_{AD}$ , presión de diseño amplificada.

En el caso del factor de respuesta de fondo,  $B$ , la NTCDV 2004, presenta una expresión distinta a la actual, pero es posible hacer una equivalencia basada en los parámetros que definen dicha ecuación, tal como se muestra a continuación.

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{\frac{914}{H}} \left( \frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{x}{122}} \right) \left( \frac{x}{(1+x^2)^{\frac{4}{3}}} \right) dx \quad \text{para la NTCDV 2004} \quad (3.2)$$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.90 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0.63}} \quad \text{para la NTCDV 2017} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, para hacer la equivalencia y obtener resultados que puedan ser comparables, de la ecuación 3.3, se realizó un despeje de la variable elevada al cuadrado para que al final, la ecuación quedara de la siguiente manera:

$$B = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.90 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0.63}}} \quad (3.4)$$

De manera similar, se realizaron ajustes a los factores de respuesta en resonancia, de amplificación dinámica y a la presión de diseño. El procedimiento para elaborar los ajustes se muestra a continuación:

La NTCDV 2004 establece tres expresiones que, en conjunto, representan una equivalencia con el factor de respuesta en resonancia,  $R$ . Las tres ecuaciones son: el factor reductor por tamaño,  $S$ , la relación de energía en ráfaga,  $F$  y la fracción de amortiguamiento crítico,  $\beta$ .

$$S = \frac{\pi}{3} \left( \frac{1}{1 + \frac{8 n_0 H}{3 V_H}} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{10 n_0 b}{V_H}} \right) \quad (3.5)$$

$$F = \frac{x_0^2}{(1 + x_0^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (3.6)$$

Multiplicando, la ecuación 3.5 por la ecuación 3.6 y el producto, dividido por la fracción de amortiguamiento crítico, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{S F}{\beta} = \frac{\left[ \frac{\pi}{3} \left( \frac{1}{1 + \frac{8 n_0 H}{3 V_H}} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{10 n_0 b}{V_H}} \right) \right] \left[ \frac{x_0^2}{(1 + x_0^2)^{\frac{4}{3}}} \right]}{\beta} \quad (3.7)$$

$$R^2 = \frac{\pi}{4 \zeta_{1,x}} S_L R_h R_b \quad (3.8)$$

La ecuación 3.7, corresponde a la NTCDV 2004 y la ecuación 3.8, corresponde a la NTCDV 2017. Por último, al realizar el despeje de la variable elevada al cuadrado en la ecuación 3.8, se obtiene la siguiente equivalencia:

$$R = \sqrt{\frac{\pi}{4 \zeta_{1,x}} S_L R_h R_b} \cong \frac{S F}{\beta} \quad (3.9)$$

En la NTCDV 2017, el FAD se separó en dos partes para efectos de comparación con respecto a la NTCDV 2004, una que será aplicada a las presiones de diseño para transformarlas en términos del lapso de promediación de 10 minutos y otra que representará como tal el FAD.

Como resultado de la subdivisión, se obtuvo un factor que, para fines de este trabajo, se denomina *factor transformante*,  $F_{TF}$ .

$$F_{AD} = 1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2} \quad (3.10)$$

$$F_{TF} = \frac{1}{1 + 7 I_v(z_s)} \quad (3.11)$$

Por lo tanto, las presiones de diseño quedan definidas por las ecuaciones 3.12 y 3.13, mismas que fueron ajustadas para obtener una equivalencia entre las dos ediciones de las normas.

- Presión de diseño (NTCDV 2004 vs NTCDV 2017)

$$p_z \cong p_z F_{TF} \quad (3.12)$$

- Presión de diseño amplificada (NTCDV 2004 vs NTCDV 2017)

$$p_z F_{AD} \cong p_z F_{TF} F_{AD} \quad (3.13)$$

De esta manera, se habrán definido todos los factores que serán comparados y analizados. Un resumen de los resultados se presenta de la Tabla 29 a 32.

**Tabla 29 Resultados de  $F_\alpha$ ,  $V_D$  y  $p_z$  con cada normativa de viento**

Edificio	$F_\alpha$			$V_D$ [m/s]			$p_z$ estática [kg/m <sup>2</sup> ]		
	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008
1	1.857	1.857	1.513	54.812	54.812	54.478	173.049	173.049	172.965
2	1.549	1.549	1.262	45.718	45.718	45.439	120.391	120.391	120.333
3	1.295	1.295	1.055	38.224	38.224	37.991	84.157	84.157	84.116
4	1.295	1.295	1.055	38.224	38.224	37.991	84.157	84.157	84.116
5	1.295	1.295	1.055	38.224	38.224	37.991	84.157	84.157	84.116
6	1.295	1.295	1.055	38.224	38.224	37.991	84.157	84.157	84.116
7	1.295	1.295	1.055	38.224	38.224	37.991	84.157	84.157	84.116
8	1.487	1.487	1.212	43.885	43.885	43.617	110.930	110.930	110.876
9	1.328	1.328	1.082	39.201	39.201	38.962	88.516	88.516	88.473
10	1.295	1.295	1.055	38.224	38.224	37.991	84.157	84.157	84.116



**Tabla 30 Resultados de  $p_z$  ajustada,  $F'_\alpha$  y  $V'_D$  con cada normativa de viento**

Edificio	$p_z$ ajustada [ $kg/m^2$ ]			$F'_\alpha$			$V'_D$ [ $m/s$ ]		
	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008
1	173.049	No Aplica	No Aplica	5.820	No Aplica	No Aplica	50.642	No Aplica	No Aplica
2	120.391	45.343	45.321	2.699	1.480	0.814	34.488	25.277	25.277
3	84.157	25.924	25.911	1.265	1.091	0.600	23.606	18.625	18.625
4	84.157	25.924	25.911	1.265	1.091	0.600	23.606	18.625	18.625
5	84.157	25.924	25.911	1.265	1.091	0.600	23.606	18.625	18.625
6	84.157	25.924	25.911	1.265	1.091	0.600	23.606	18.625	18.625
7	84.157	25.924	25.911	1.265	1.091	0.600	23.606	18.625	18.625
8	110.930	39.977	39.958	2.270	1.381	0.759	31.625	23.573	23.573
9	88.516	28.086	28.072	1.407	1.139	0.626	24.902	19.445	19.445
10	84.157	25.924	25.911	1.265	1.091	0.600	23.606	18.625	18.625

**Tabla 31 Resultados de  $g$ ,  $v$  y  $R$  con cada normativa de viento**

Edificio	$g$			$v$ [ $Hz$ ]			$R$		
	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008
1	1.582	No Aplica	No Aplica	0.115	No Aplica	No Aplica	3.201	No Aplica	No Aplica
2	1.654	3.230	3.230	0.212	0.165	0.165	1.398	0.609	0.609
3	1.651	3.269	3.269	0.208	0.188	0.188	0.077	0.197	0.197
4	1.648	3.256	3.256	0.202	0.180	0.180	0.060	0.173	0.173
5	1.642	3.235	3.235	0.192	0.168	0.168	0.039	0.139	0.139
6	1.644	3.244	3.244	0.196	0.173	0.173	0.054	0.163	0.163
7	1.645	3.246	3.246	0.197	0.174	0.174	0.056	0.168	0.168
8	1.678	3.221	3.221	0.264	0.160	0.160	0.103	0.172	0.172
9	1.628	3.162	3.162	0.170	0.133	0.133	0.018	0.090	0.090
10	1.642	3.240	3.240	0.193	0.171	0.171	0.083	0.206	0.206

**Tabla 32 Resultados de  $B$ ,  $F_{AD}$  y  $p_z * F_{AD}$  con cada normativa de viento**

Edificio	$B$			$F_{AD}$			$p_z * F_{AD}$		
	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008
1	0.269	No Aplica	No Aplica	1.142	No Aplica	No Aplica	197.683	No Aplica	No Aplica
2	0.602	0.712	0.712	1.260	2.431	2.431	151.669	110.215	110.161
3	0.819	0.716	0.716	1.240	2.559	2.559	104.389	66.329	66.297
4	0.796	0.712	0.712	1.220	2.530	2.530	102.691	65.595	65.563
5	0.766	0.705	0.705	1.194	2.493	2.493	100.484	64.628	64.597
6	0.769	0.706	0.706	1.203	2.509	2.509	101.278	65.048	65.016
7	0.769	0.706	0.706	1.205	2.512	2.512	101.407	65.120	65.088
8	0.555	0.695	0.695	0.957	2.170	2.170	106.157	86.743	86.701
9	0.646	0.685	0.685	1.082	2.343	2.343	95.815	65.818	65.786
10	0.728	0.697	0.697	1.197	2.512	2.512	100.755	65.111	65.079

Dado que las características de los edificios seleccionados permiten utilizar el método dinámico, el cálculo de algunos factores como el factor de variación con la altura, la presión de diseño estática y la velocidad de diseño estática, con las características del Edificio 1, no representa significado alguno, ya que por las condiciones que establecen las nuevas normas y el manual de la CFE, edificios con altura mayor a 200 m, requieren pruebas en túnel de viento, por lo que, técnicamente no es posible calcular ningún factor que intervenga en la determinación de la respuesta dinámica. Debido a lo anterior, algunos resultados, sólo para el Edificio 1, no aplican para su comparación.

### Factor de variación de la velocidad del viento con la altura, $F_\alpha$

El factor de variación con la altura,  $F_\alpha$ , no presenta ningún cambio con respecto a la NTCDV 2004, ya que se mantuvieron los mismos parámetros para su cálculo. En el MDOCDV 2008, el factor de variación con la altura presenta variaciones en la expresión que, con base en la categoría del terreno, se modifica el resultado y gracias a ello, los resultados difieren, no de manera significativa de las dos versiones de las NTCDV (figura 43).

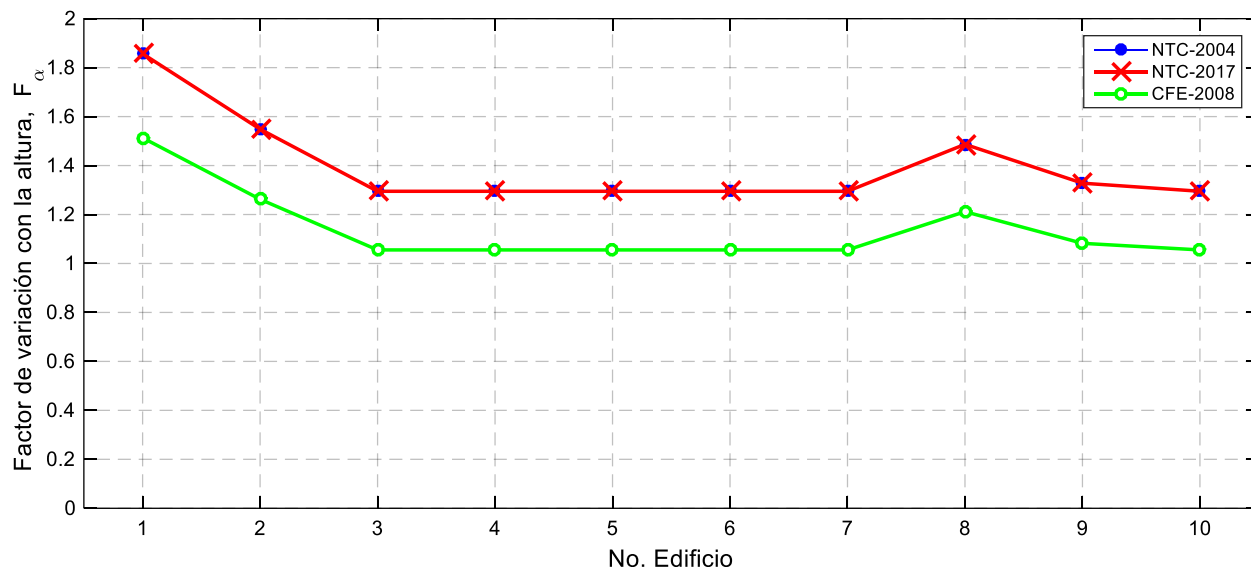


Figura 43 Comparación del factor de variación con la altura,  $F_\alpha$  (método estático)

Lo que resulta interesante notar es que, con las características de los edificios seleccionados, el factor de variación con la altura resultó mayor a la unidad en todos los casos, lo que significa que con cualquier valor que adopte el factor de topografía,  $F_{TR}$ , la velocidad de diseño incrementará el valor de la velocidad regional.

### Velocidad de diseño, $V_D$

La velocidad de diseño en ambas versiones de las normas, es prácticamente la misma, debido a que en la metodología de cálculo del método estático no hubo cambio alguno, por lo tanto, los resultados no difieren más que del MDOCDV 2008 (figura 44). Sin embargo, es posible afirmar que la diferencia con los resultados que arroja el MDOCDV 2008, es prácticamente nula.

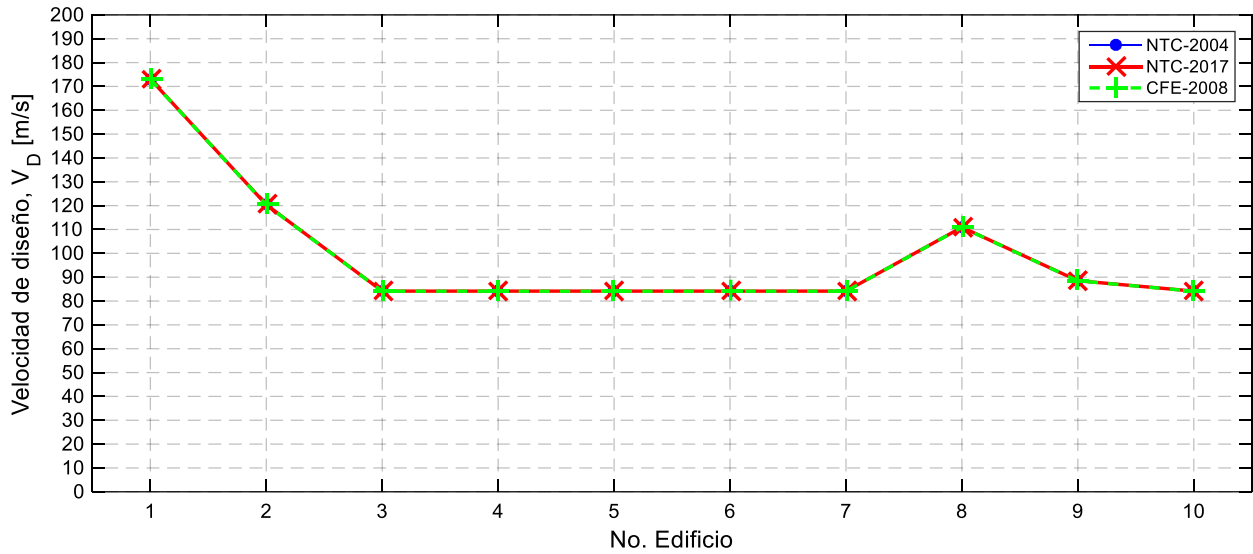


Figura 44 Comparación de la velocidad de diseño,  $V_D$  (método estático)

### Presión de diseño, $p_z$

Con respecto a las presiones de diseño y dado que están en función de la velocidad de diseño, los resultados obtenidos con las dos versiones de las NTC DV y con el MDOCDV 2008, mantienen el mismo comportamiento (figura 45).

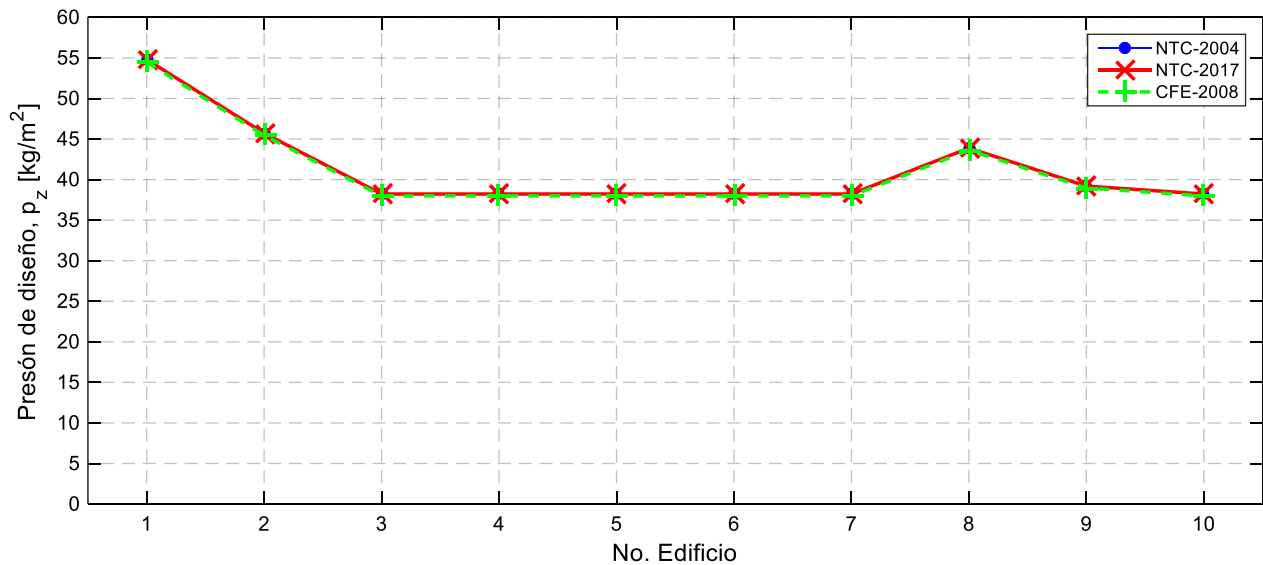
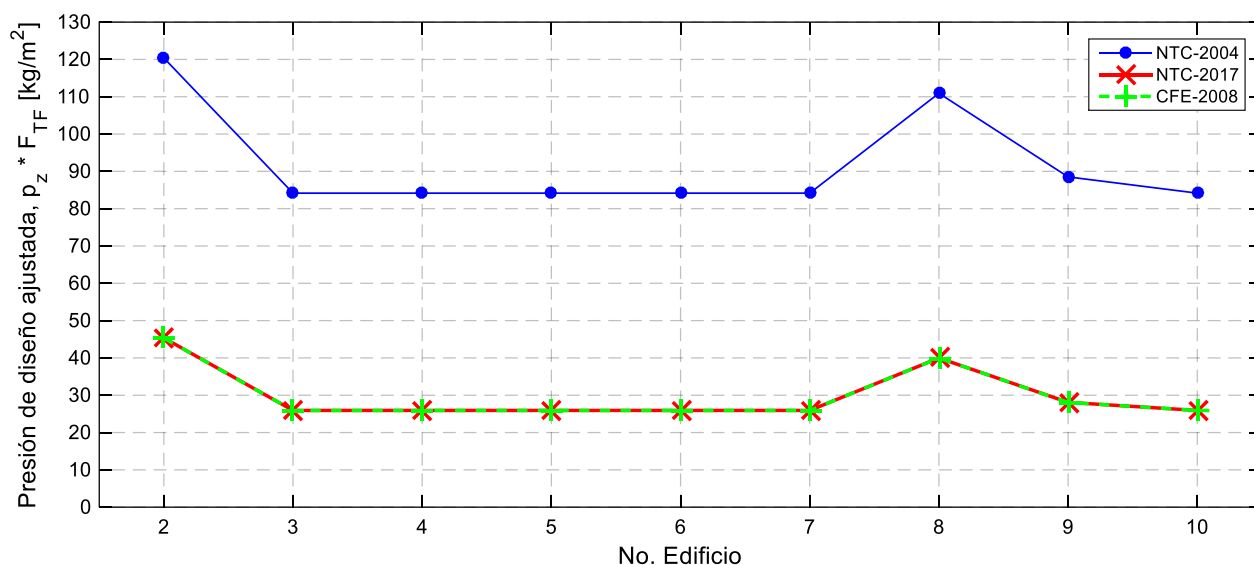


Figura 45 Comparación de la presión de diseño,  $p_z$  (método estático)

### Presión de diseño ajustada, $p_z * F_{TF}$

La presión de diseño ajustada contempla la conversión de las velocidades regionales a velocidades medias de diez minutos con el *factor transformante*. Esto con el propósito de identificar el incremento que genera el FAD. La Figura 46 muestra que las presiones de diseño se redujeron significativamente, esto gracias a que, el factor transformante resulta en todos los casos menor a la unidad. Dicha transformación indica que mientras sea mayor el lapso de promediación, menores serán las presiones.



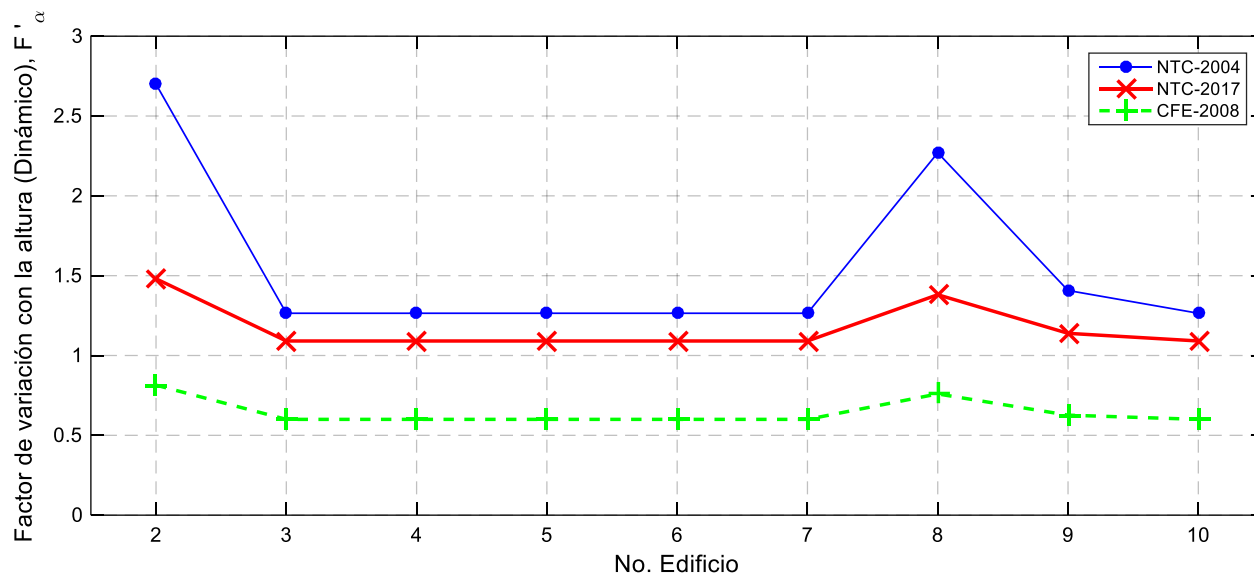
**Figura 46 Comparación del ajuste de las presiones de diseño de la NTCDV 2017 con base en el lapso de promediación,  $p_z * F_{TF}$ . (Nota: Las presiones de la NTCDV 2004 no fueron ajustadas)**

En este último caso, donde se transforman las presiones de diseño, ya no intervienen aquellas que consideran las características del Edificio 1, debido a que el factor transformante está en función del índice de turbulencia,  $I_v(z_s)$ , factor que está limitado por las condiciones de frontera  $z_{min}$  y  $z_{max}$ , mismas que corresponden a la altura mínima y máxima con valores de 10 m y 200 m, respectivamente. Por lo tanto, la altura del Edificio 1 cuyo valor es de 381 m, no permite determinar el valor del índice de turbulencia y, por ende, ningún otro factor asociado al método dinámico.

### Factor de variación de la velocidad del viento con la altura para efectos dinámicos, $F'_\alpha$

El factor de variación con la altura, también contempla los efectos dinámicos del viento al incluirse, en las NTCDV (2004 y 2017), una ecuación idéntica a la expresada en el método estático con la diferencia de que, en la NTCDV 2017, se incluye un exponente que determina la forma de la variación de la velocidad con la altura para un intervalo de 10 min, es decir, se introduce el efecto del lapso de promediación para el cual está contemplado en las normas. Mientras tanto, en la NTCDV 2004, se modifica la velocidad regional con un factor correctivo por exposición el cual contempla los efectos dinámicos del viento, además de no estar acotado por un intervalo de alturas mínimas y máximas, pero es equivalente al factor de variación con la altura de la NTCDV 2017.

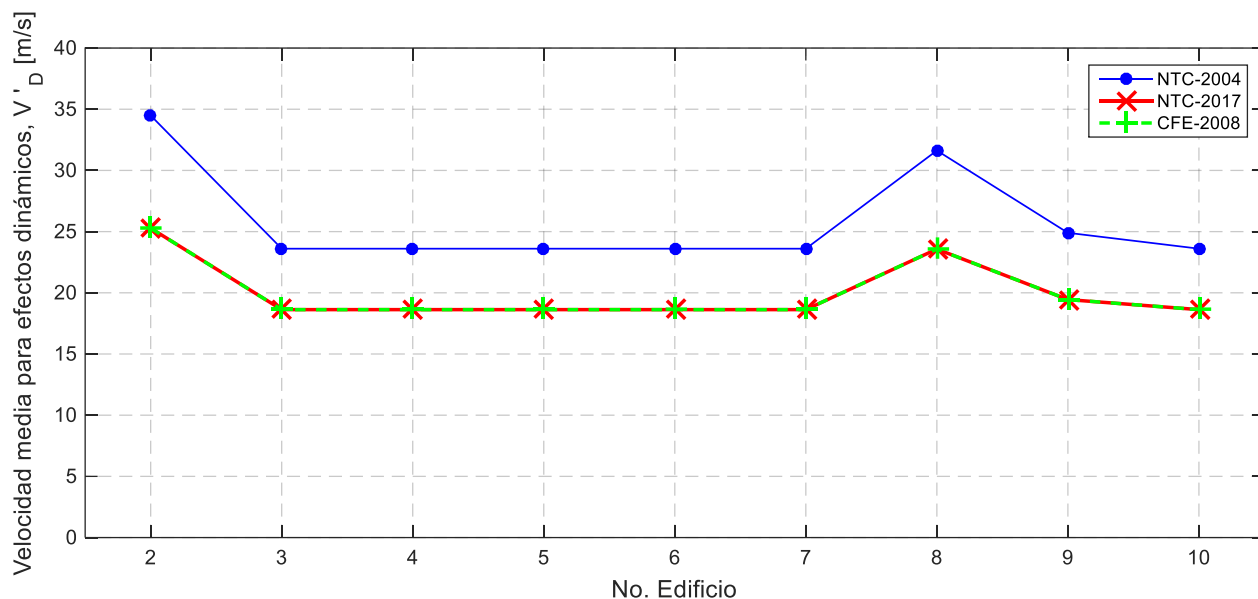
Los resultados indican una congruencia con los edificios de concreto mientras que con los que están compuestos de acero, como lo son el Edificio 2 y 8, muestran una variación bastante marcada con respecto a los demás (figura 47). En este caso dado que, para el cálculo de este parámetro, no se indica el tipo de material, las características geométricas de los edificios influirán directamente en el resultado de este parámetro.



**Figura 47 Comparación del factor de variación con la altura,  $F'_\alpha$  (método dinámico)**

### **Velocidad de diseño para efectos dinámicos, $V'_D$**

En ambas ediciones de las NTCDV, se establece una velocidad media para efectos dinámicos, con la que se calcularán los factores involucrados en el cálculo de la respuesta dinámica de las estructuras, misma que corresponde a la transformación de las velocidades regionales en función de un lapso de promediación definido. En el caso de la NTCDV 2004, el lapso de promediación considerado es de una hora, mientras que en la NTCDV 2017 es de diez minutos al igual que en el MDOCDV 2008. Considerando ambos casos y dado que se observó la variación de las presiones en función de los lapsos de promediación (figura 46), las velocidades para efectos dinámicos de las dos ediciones de las NTCDV, varían de igual manera, es decir, los resultados de las velocidades para efectos dinámicos son menores cuando se manejan lapsos de promediación mayores (figura 48).



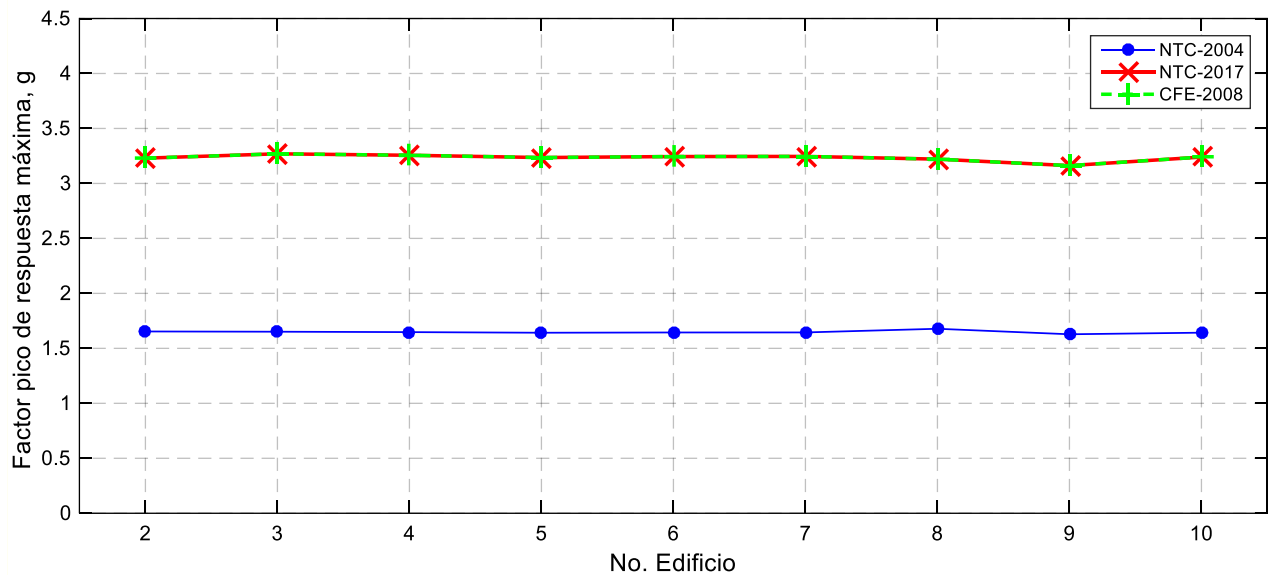
**Figura 48 Comparación de la velocidad media para efectos dinámicos,  $V'_D$  (método dinámico)**

Los resultados reflejan valores más conservadores con la NTCDV 2004 que con la actual versión de las NTCDV lo que indica que, actualmente es posible optimizar las fuerzas a las que serán sometidos los edificios. Más adelante se retomará el cálculo de las fuerzas y el cambio que presentan las nuevas normas.

### **Factor pico de respuesta máxima, $g$ y $k_p$**

Una de las maneras de identificar los lapsos de promediación que utilizan las NTCDV 2004 y 2017, es mediante la ecuación del factor pico de respuesta máxima. La ecuación consta de dos sumandos, el primero representado por un radical y el segundo por un cociente, ambos términos se caracterizan por contener un logaritmo natural donde su argumento es una constante que representa al tiempo de promediación. La NTCDV 2004, presentan una variación en la ecuación del factor pico, al estar factorizado por un número fraccionario.

Dadas las diferencias en función del lapso de promediación, tal como se especifica en la NTCDV 2004, los valores deberán ser mayores a 1.48 y, según la NTCDV 2017, serán mayores que 3.0. Estas condiciones se cumplen tal como se muestra en la Tabla 31, resultados que son representados de manera gráfica con la Figura 49.

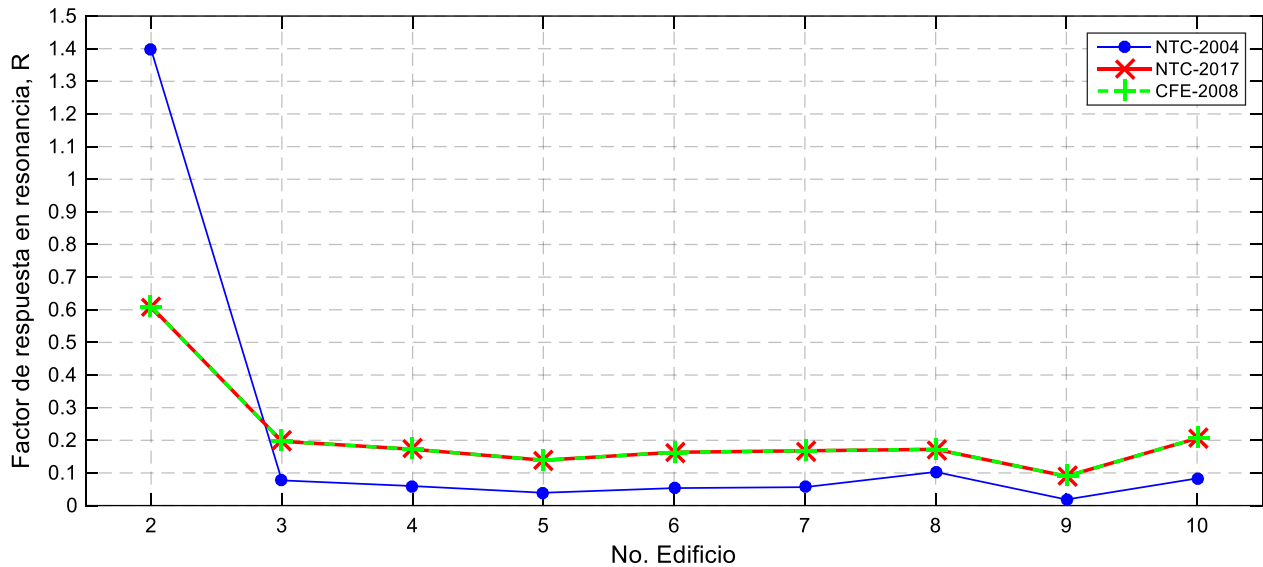


**Figura 49 Comparación del factor de respuesta máxima,  $g$  (método dinámico)**

Resulta interesante notar que, con cada una de las características tanto geométricas como mecánicas de los edificios, el factor pico de respuesta máxima mantiene una similitud en todos los casos empleando cada una de las normas, por ello, se compararán los factores que intervienen en su cálculo, mismos que corresponden a algunas de las equivalencias realizadas anteriormente con la finalidad de comprender el comportamiento del factor pico con cada edificio.

### **Factor de respuesta en resonancia, $R$**

El primero de ellos es el factor de respuesta en resonancia que, para lograr una similitud con las normas actuales, se requirió agrupar tres factores. Los resultados se muestran gráficamente en la Figura 50.



**Figura 50 Comparación del factor de respuesta en resonancia,  $R$  (método dinámico)**

Como es evidente, los resultados del Edificio 2 salen de la tendencia que marcan los demás edificios. A simple vista, la tendencia la establece la altura de cada edificio, empleando las tres normativas, con lo que se esperaría que los edificios más altos, presenten resultados con mayor magnitud. Observación que no es válida al contemplar que, el Edificio 9 resulta ser más alto que el Edificio 10, y los resultados reflejan lo contrario. Por lo tanto, fue necesario tomar en cuenta cada uno de los parámetros que son función del factor de respuesta en resonancia tanto para la NTCDV 2004 como para la NTCDV 2017. Sin embargo, en la norma del 2004, algunos parámetros de manera individual no representan la tendencia de los resultados, como lo es la frecuencia natural de vibrar de cada edificio, a pesar de ser un parámetro determinante, ya que mantiene una relación inversamente proporcional al factor de respuesta en resonancia; a menor frecuencia, mayor es el factor de respuesta en resonancia.

Debido a que la frecuencia de vibrar no es el único parámetro necesario para el cálculo, el comportamiento del factor de respuesta en resonancia,  $R$ , se atribuye al inverso de la longitud de onda que consta de la relación entre la frecuencia natural de vibrar y la velocidad de diseño principalmente, parámetros que a su vez, definen la relación de energía en ráfaga,  $F$ . La Tabla 33, muestra los resultados ordenados de mayor a menor magnitud del factor de respuesta en resonancia en conjunto con su correspondiente relación entre la frecuencia natural de vibrar y la velocidad de diseño para efectos dinámicos.



**Tabla 33 Valores de  $R$ ,  $V_H$  y  $F$  (NTCDV, 2004)**

EDIFICIO	$R$ NTC 2004	$b$ [m]	$h$ [m]	$n_0$ [Hz]	$V_H$ [m/s]	$n_0/V_H$ [ondas/m]	$F$
1	3.201	129.54	381.00	0.120	50.642	0.002	0.424
2	1.398	51.21	131.06	0.254	34.488	0.007	0.228
8	0.103	76.50	103.02	0.667	31.625	0.021	0.115
10	0.083	56.69	45.72	0.602	23.606	0.026	0.101
3	0.077	40.54	45.72	0.709	23.606	0.030	0.091
4	0.060	44.20	45.72	0.763	23.606	0.032	0.086
7	0.056	48.77	45.72	0.752	23.606	0.032	0.087
6	0.054	48.77	45.72	0.769	23.606	0.033	0.086
5	0.039	49.38	45.72	0.870	23.606	0.037	0.079
9	0.018	72.54	53.04	1.020	24.902	0.041	0.074

Los resultados indican que entre menor sea el inverso de la longitud de onda,  $n_0/V_H$ , mayor será el valor de la relación de energía en ráfaga,  $F$ , con lo que el factor de respuesta en resonancia dependerá principalmente del valor que adquiera dicha relación.

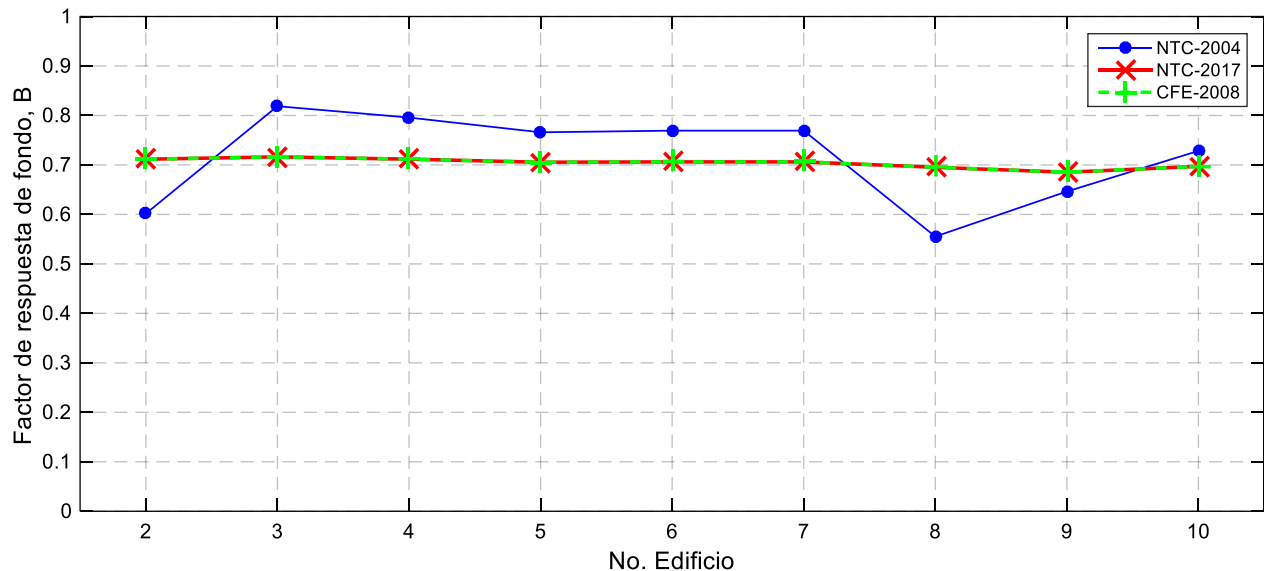
En lo que respecta a los resultados del factor de respuesta en resonancia, empleando la NTCDV 2017, no demuestran una tendencia evidente como en el caso anterior. Sin embargo, la frecuencia natural de vibrar sigue siendo predominante en los resultados finales (tabla 34).

**Tabla 34 Valores de  $R$  y  $n_0$  (NTCDV, 2017)**

Edificio	$R$ NTC 2017	$b$ [m]	$h$ [m]	$n_0$ [Hz]
2	0.609	51.21	131.06	0.254
8	0.206	56.69	45.72	0.667
10	0.197	40.54	45.72	0.602
3	0.173	44.20	45.72	0.709
4	0.172	76.50	103.02	0.763
7	0.168	48.77	45.72	0.752
6	0.163	48.77	45.72	0.769
5	0.139	49.38	45.72	0.870
9	0.090	72.54	53.04	1.020

### Factor de respuesta de fondo, $B$

El último factor que permite el cálculo del factor pico de respuesta máxima, es el factor de respuesta de fondo,  $B$  (figura 51). En ambas ediciones de las NTCDV, dicho factor depende principalmente de las características geométricas de los edificios, especialmente de la altura y el ancho de la cara de barlovento. Por lo tanto, el comportamiento que tendrá el factor de respuesta de fondo, estará vinculado con las dimensiones del edificio.



**Figura 51 Comparación del factor de respuesta de fondo, B (método dinámico)**

En la NTCDV 2004, la ecuación está definida por una integral donde su límite superior está en función de la altura del edificio. Dicho límite se define por la relación  $914/H$ , en este sentido, mientras el edificio sea más alto, el valor de la integral será menor en comparación con edificios más bajos pero, además de dicha característica, el valor de la suma de sus dimensiones principales del edificio, de manera general definirán su comportamiento. Al igual que el factor de respuesta en resonancia, la Tabla 35 muestra los resultados enlistados de mayor a menor magnitud de manera que sea posible identificar su tendencia basada en las características de los edificios analizados.

**Tabla 35 Valores de B y (b + h) (NTCDV, 2004)**

Edificio	B	b	h	b+h
	NTC 2004	[m]	[m]	[m]
3	0.819	40.54	45.72	86.260
4	0.796	44.20	45.72	89.920
6	0.769	48.77	45.72	94.490
7	0.769	48.77	45.72	94.490
5	0.766	49.38	45.72	95.100
10	0.728	56.69	45.72	102.410
9	0.646	72.54	53.04	125.580
2	0.602	51.21	131.06	182.270
8	0.555	76.50	103.02	179.520

En este caso, las únicas variables, función del factor de respuesta de fondo, son la base y la altura del edificio donde sus magnitudes sumadas establecen la tendencia de dicho factor con una

relación inversamente proporcional, de tal manera que, entre mayor sea la suma de la base y la altura del edificio, menor será el factor de respuesta de fondo.

En lo que respecta a los resultados obtenidos con la NTCDV 2017, la tendencia del factor de respuesta de fondo depende principalmente de la relación entre dos parámetros: la suma de la altura y base del edificio y de la longitud de escala de turbulencia (tabla 36).

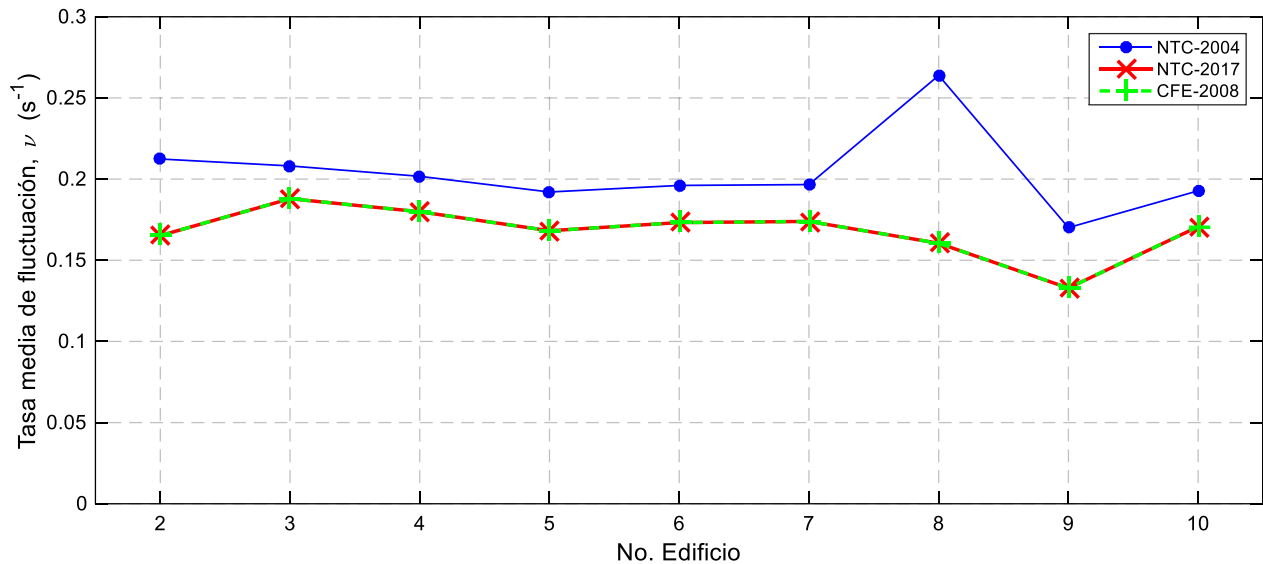
**Tabla 36 Valores de  $B$ ,  $L_{zs}$  y  $(b + h)/L_{zs}$  (NTCDV, 2017)**

EDIFICIO	$B$ NTC 2017	$b$ [m]	$h$ [m]	$L_{zs}$	$\frac{b + h}{L_{zs}}$
3	0.716	40.54	45.72	79.262	1.088
4	0.712	44.20	45.72	79.262	1.134
2	0.712	51.21	131.06	160.508	1.136
6	0.706	48.77	45.72	79.262	1.192
7	0.706	48.77	45.72	79.262	1.192
5	0.705	49.38	45.72	79.262	1.200
10	0.697	56.69	45.72	79.262	1.292
8	0.695	76.50	103.02	136.60	1.314
9	0.685	72.54	53.04	87.554	1.434

Dado que la relación  $(b + h)/L_{zs}$ , se encuentra expresada en el denominador de la ecuación del factor de respuesta de fondo, entre mayor sea el valor de  $(b + h)/L_{zs}$ , el factor tenderá a cero.

### Tasa media de fluctuación, $\nu$

Finalmente, el valor de la tasa media de fluctuación,  $\nu$ , es posible determinar gracias a los factores de respuesta en resonancia y de fondo, de los que es función. La Figura 52 muestra los resultados correspondientes a cada normativa de viento.



**Figura 52 Comparación de la tasa media de fluctuación,  $\nu$  (método dinámico)**

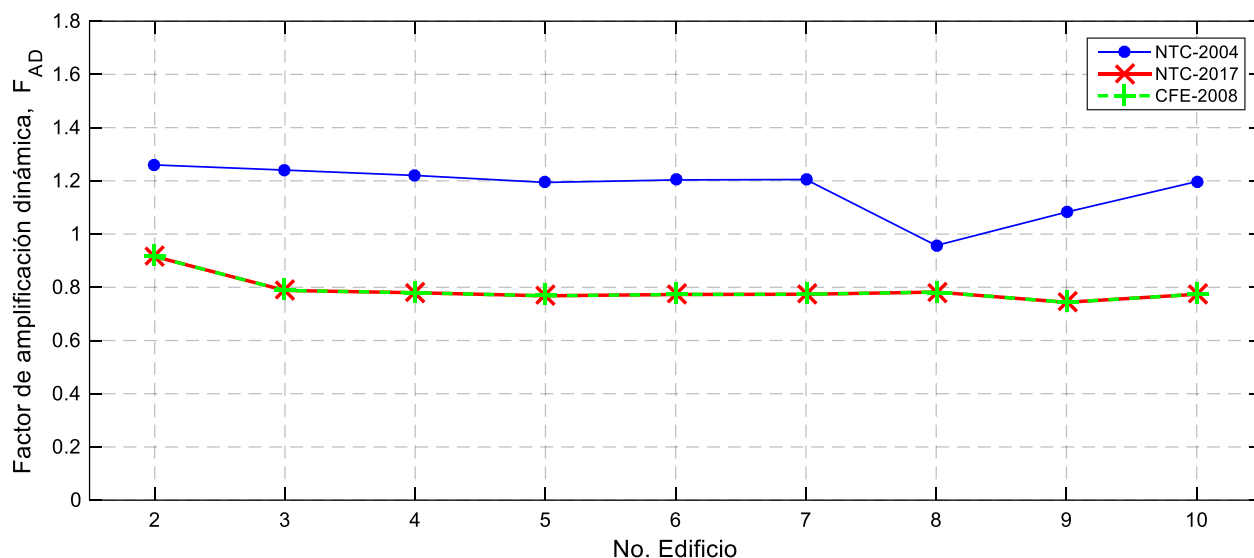
Cabe destacar que los valores de la tasa media de fluctuación de los edificios 3 al 7 y de los edificios 9 y 10, muestran un comportamiento similar con cada una de las normativas, a diferencia de los edificios 2 y 8 que, comparando las dos ediciones de las NTCDV, no muestran una tendencia similar entre sí. Tomando como referencia gráfica las líneas proyectadas entre los valores de un edificio a otro, el caso de los edificios 2 y 8 se esperaría que, con ambas normativas, las pendientes tuvieran el mismo signo; sin embargo, del Edificio 2 al 3 y del 7 al 8, las pendientes son contrarias.

Para comprender esta diferencia y justificar los resultados obtenidos, es necesario recurrir al significado de la tasa media de fluctuación en la respuesta dinámica de los edificios sometidos a la acción del viento. Se puede asimilar a la frecuencia natural de vibración del edificio, con la diferencia de que está asociado con la máxima respuesta que se puede presentar en un evento, por ello, el factor pico de respuesta máxima depende de dicha tasa media de fluctuación o denominada de otra manera como la frecuencia de cruces por cero en un tiempo de observación dado. Por lo tanto, interviene de nuevo el concepto del lapso de promediación en los resultados, donde las características de los edificios, inducen comportamientos distintos, pero con la generalidad de que, con lapsos de promediación menores, se obtienen resultados de mayor magnitud, tal como se muestra en la Figura 52 donde se aprecia que, con la NTCDV 2017, los resultados fueron menores en comparación con la NTCDV 2004.

### **Factor de amplificación dinámica, $F_{AD}$**

Técnicamente, la comparación entre ambas expresiones del FAD, involucra el factor transformante, mismo que genera que los resultados sean menores a la unidad y erróneamente se considere como un factor reductor. Por lo que, las presiones afectadas por el FAD, aplicadas a la superficie del edificio serán menores en comparación con las presiones de diseño estáticas, permitiendo que se opte por diseñar sin contemplar los efectos dinámicos del viento.

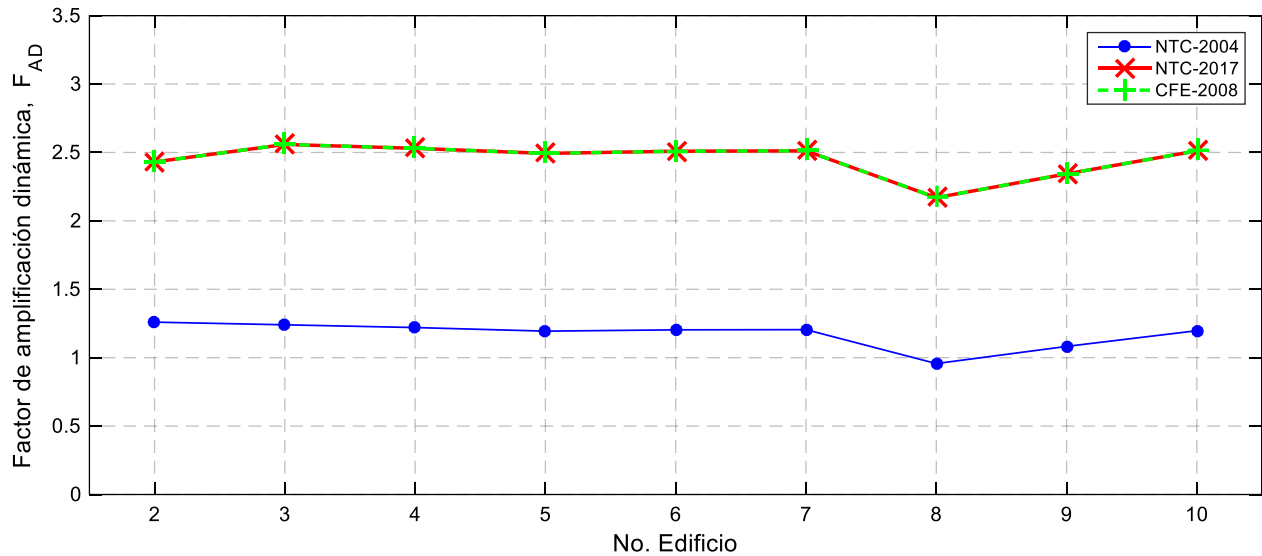
Al realizar la comparación del FAD presente en ambas ediciones de las NTCDV (2004 y 2017), sin realizar modificación alguna a las expresiones que lo definen, es posible visualizar la reducción aparente que tendrán las presiones de diseño en las NTCDV, tal como se muestra en la Figura 53, donde los valores correspondientes a la NTCDV 2017, resultaron menor a la unidad mientras que, en la NTCDV 2004, sólo el Edificio 8 presentó un valor menor que uno.



**Figura 53 Comparación del factor de amplificación dinámica,  $F_{AD}$ , contemplando el factor transformante,  $F_{TF}$**

Al modificar la ecuación del FAD en la NTCDV 2017, separando el factor transformante para dejar en términos comparables con la NTCDV 2004, es posible observar la magnitud de la amplificación que sufrirán las presiones de diseño. Los resultados de la modificación se presentan en la Figura 54, por lo que, ya es posible identificar que hubo un incremento en el término amplificador de las nuevas NTCDV, además de presentar un comportamiento similar con cada uno de los edificios si se comparan las líneas proyectadas entre los puntos de cada edificio, al ser casi paralelas.

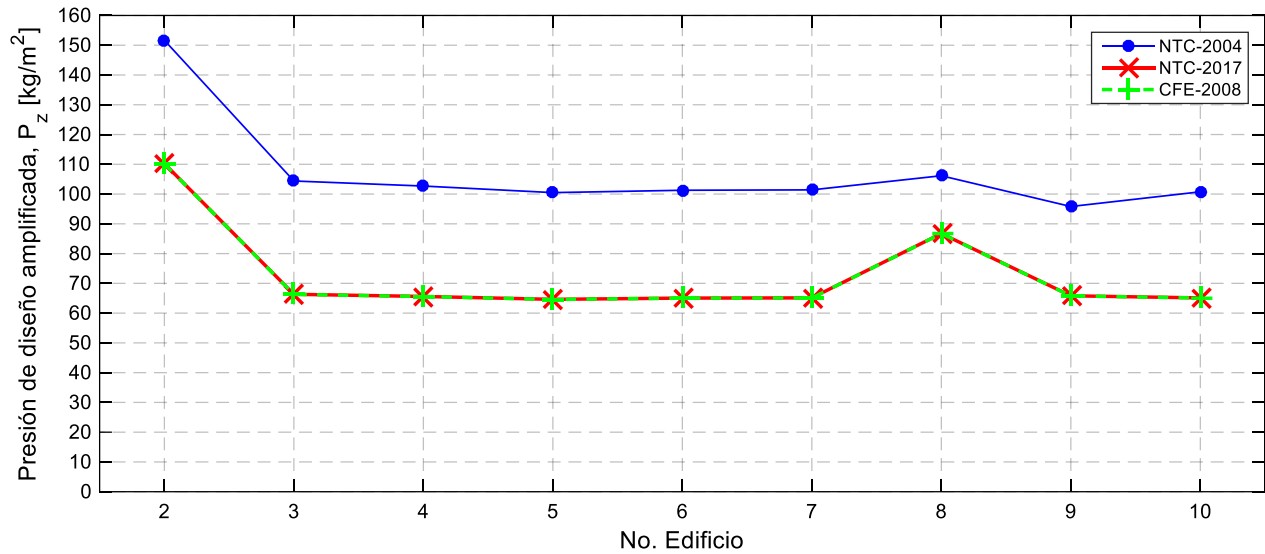
Pero en términos prácticos, la comparación del FAD de ambas ediciones de las NTCDV, no representa sentido alguno hasta no aplicarlo a las presiones a las que serán sometidos los edificios, por ello, la culminación del análisis de los factores será con las presiones amplificadas de tal manera que, permita establecer sus respectivas conclusiones, gracias a que el FAD engloba todos los factores que fueron analizados hasta este punto.



**Figura 54** Comparación del factor de amplificación dinámica,  $F_{AD}$ , sin contemplar el factor transformante,  $F_{TF}$

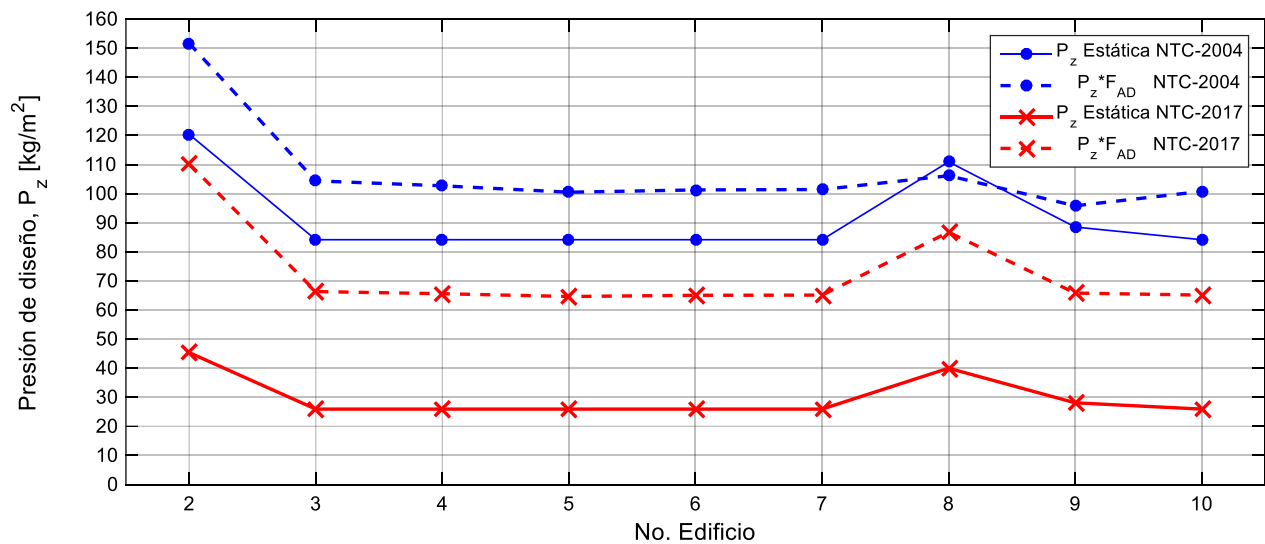
#### Presiones de diseño amplificadas, $p_z * F_{AD}$

Haber analizado cada uno de los factores involucrados en la determinación de la respuesta dinámica de las estructuras, permitió dar una idea de la magnitud de los valores esperados de las presiones, ya sea mayores o menores a las establecidas en la edición anterior de las NTCDV (2004). Primero, se presentarán los resultados de las presiones afectadas por el FAD de ambas ediciones de las NTCDV (2004 y 2017), sin contemplar el factor transformante, debido a que dicho factor ya fue considerado en las presiones ajustadas (figura 46). Posteriormente se presentarán las presiones estáticas en comparación con las presiones amplificadas (figura 56).



**Figura 55 Comparación de la presión de diseño amplificada,  $p_z * F_{AD}$**

La Figura 55 muestra las presiones de diseño determinadas con el método estático presente en la normatividad de viento y afectadas por el FAD, dado que la metodología del método estático se conservó en la nueva versión de las NTCDV (2017), los resultados de cada edificio conservan la misma tendencia, siendo el valor del FAD lo que genera la diferencia entre una y otra edición de las NTCDV, tal como el caso del Edificio 8, que es el más evidente. Por lo tanto, para identificar el incremento de las presiones amplificadas con respecto a las presiones estáticas, se requiere proyectar en el mismo plano dichos valores (figura 56).



**Figura 56 Comparación entre la presión de diseño estática y la presión de diseño amplificada empleando la normatividad de viento**

Como es evidente, en términos de amplificación, el FAD de la NTCDV 2017 incrementa en más del doble la magnitud de las presiones estáticas a diferencia del definido en la NTCDV 2004. Por ejemplo, el Edificio 8 presenta dos cuestiones (tabla 37); la primera es con respecto a la presión contemplando el FAD de la NTCDV 2004, el cual resultó menor a la unidad con lo que, el signo negativo, representa un decremento del 4%, y la segunda corresponde a los resultados empleando las actuales normas, donde el incremento resultó mayor del 116%, es decir, las presiones amplificadas son 2.16 veces mayores que las presiones estáticas.

Estadísticamente, a pesar de que el número de muestras (edificios) no es suficiente para concluir que, en todos los casos posibles, el incremento de las presiones sea de por lo menos el doble empleando la NTCDV 2017, en este caso, los resultados indican que es posible que se cumpla dicho comportamiento. En promedio, empleando la NTCDV 2017, representan un incremento de 2.45 veces más que las presiones estáticas, mientras que con la NTCDV 2004, solo representan en promedio 1.17 veces más que las presiones determinadas con el método estático.

Tomando en cuenta la comparación entre las presiones amplificadas de la NTCDV 2017 con respecto a las presiones amplificadas de la NTCDV 2004, los resultados reflejan un decremento en la magnitud de los valores, debido a la reducción aparente generada por el factor transformante (tabla 38). En promedio, contemplando los edificios analizados, la reducción global es del 32.46% con respecto a las presiones amplificadas de la NTCDV 2004.

**Tabla 37 Porcentaje de incremento de las presiones amplificadas con respecto a las presiones de diseño estáticas**

Edificio	$P_z$			$P_z * F_{AD}$			% de incremento		
	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008	NTC 2004	NTC 2017	MDOC 2008
1	173.049	No Aplica	No Aplica	197.683	No Aplica	No Aplica	14.23%	---	---
2	120.391	45.343	45.321	151.669	110.215	110.161	25.98%	143.07%	143.07%
3	84.157	25.924	25.911	104.389	66.329	66.297	24.04%	155.86%	155.86%
4	84.157	25.924	25.911	102.691	65.595	65.563	22.02%	153.03%	153.03%
5	84.157	25.924	25.911	100.484	64.628	64.597	19.40%	149.30%	149.30%
6	84.157	25.924	25.911	101.278	65.048	65.016	20.34%	150.92%	150.92%
7	84.157	25.924	25.911	101.407	65.120	65.088	20.50%	151.20%	151.20%
8	110.930	39.977	39.958	106.157	86.743	86.701	-4.30%	116.98%	116.98%
9	88.516	28.086	28.072	95.815	65.818	65.786	8.25%	134.35%	134.35%
10	84.157	25.924	25.911	100.755	65.111	65.079	19.72%	151.16%	151.16%



**Tabla 38 Porcentaje de cambio entre las presiones amplificadas de la NTCDV 2017 con respecto a la NTCDV 2004**

<b>Edificio</b>	<b>% cambio</b>
<b>1</b>	---
<b>2</b>	27.33%
<b>3</b>	36.46%
<b>4</b>	36.12%
<b>5</b>	35.68%
<b>6</b>	35.77%
<b>7</b>	35.78%
<b>8</b>	18.29%
<b>9</b>	31.31%
<b>10</b>	35.38%

A pesar de la mayor influencia que tiene el FAD de la NTCDV 2017, los resultados finales de las presiones amplificadas son menores, incluso con respecto a las presiones estáticas calculadas con la NTCDV 2004, tal como se muestra en la Figura 56. Esto representa una optimización en la determinación de la respuesta dinámica de las estructuras con valores menos conservadores que los que presentaban la NTCDV 2004.

## **Capítulo 4 EJEMPLO DE UN EDIFICIO SOMETIDO A LAS PRESIONES CALCULADAS CON LA NTCDV (2017) CON RESPECTO A LA NTCDV (2004)**

En este capítulo se presentará el procedimiento de diseño de un edificio seleccionado de la base de datos de edificios analizada en capítulos anteriores, con la finalidad de verificar su respuesta dinámica ante la acción del viento empleando ambas ediciones de las NTCDV (2004 y 2017). Se tomó como referencia y como método de calibración de resultados la tesis “*Comparación de la respuesta estructural inducida por el viento empleando normatividad y simulación*” (Pérez León, 2016). Por lo tanto, el valor de algunos parámetros, al igual que algunos criterios, fueron extraídos de dicha fuente.

El alcance de este apartado será únicamente verificar los desplazamientos que generan las presiones afectadas por el factor de amplificación dinámica (FAD), por lo tanto, el diseño del edificio seleccionado únicamente se limitará a cumplir con la similitud de la frecuencia natural de vibrar y de su geometría, establecidas ambas en la Tabla 27, pero no en el diseño óptimo de la sección transversal de los elementos estructurales, su refuerzo longitudinal y tampoco del arreglo de muros divisorios y estructurales que pudieran contener dependiendo del uso del edificio. Sin embargo, se considerarán sus respectivas cargas vivas y muertas, así como la combinación de cargas que define la NTC para diseño por sismo.

### **Selección de la estructura**

Cualquiera de los edificios analizados en este trabajo cumple con las condiciones para ser diseñado y observar la posible respuesta dinámica ante la acción del viento. Para lograrlo, se usará como herramienta de diseño el software denominado SAP2000, mismo que se caracteriza por proporcionar resultados confiables y aproximadamente exactos con base en las características y acciones definidas previamente.

El criterio de selección de la estructura fue con base en la magnitud del factor de amplificación dinámica resultante de la NTCDV 2017. Por lo tanto, el edificio asociado al resultado con mayor magnitud, será seleccionado para su análisis y diseño.

La Tabla 39 presenta los resultados correspondientes al FAD de cada edificio, resaltando el Edificio 3, al igual que las características tanto geométricas como mecánicas del edificio seleccionado.

**Tabla 39 Valores del factor de amplificación dinámica (izq). Características del edificio seleccionado (der)**

Edificio	$F_{AD}$ NTC 2017
1	No Aplica
2	2.431
3	<b>2.559</b>
4	2.530
5	2.493
6	2.509
7	2.512
8	2.170
9	2.343
10	2.512

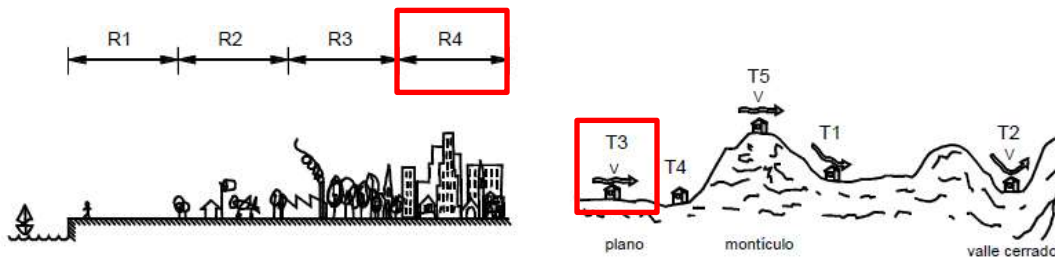
Edificio	3
H [m]	45.72
b [m]	40.54
ML [m]	69.8
$n_0 (b)$ [Hz]	0.709
$n_0 (ML)$ [Hz]	0.704
$F_{AD}$	2.559

El diseño constará en obtener una aproximación de la frecuencia natural de vibración en la dirección del viento, es decir, se buscará que el modelo digital en SAP2000 posea una frecuencia de 0.709 Hz.

Por último, el uso hipotético del edificio será de oficina, con lo que es posible definir la clasificación de la estructura. El reglamento de construcciones de la Ciudad de México establece que, cuando se trate de estructuras en las cuales su falla implique una baja pérdida de vidas humanas que ocasionen daños materiales de magnitud intermedia, corresponderá a una estructura del Grupo B. De igual manera, como se trata de oficinas, el periodo de retorno de diseño será de 50 años.

**Características del entorno de desplante del edificio**

La zona de desplante corresponde a un terreno con gran densidad de edificios altos con topografía prácticamente plana, simulando campo abierto sin cambios topográficos importantes y con rugosidad del terreno tipo R4 y topografía tipo T3, según la NTCDV 2017 (figura 57).



**Figura 57 Características seleccionadas del entorno de desplante de los edificios (NTCDV, 2017)**

Dado el entorno de desplante, se identificó una ubicación en las inmediaciones de la Ciudad de México que se asemejan a un terreno tipo R4 – T3. La ubicación del Edificio 3, hipotéticamente, se desplantará sobre cualquier punto de la avenida Reforma de la alcaldía Cuauhtémoc.

Con la información que se tiene hasta ahora, es posible seleccionar la velocidad regional. Se usará el valor correspondiente a la NTCDV 2004, presente en la tabla 3.1.1 de la misma. Este valor corresponde a una velocidad regional de 36 m/s y, para fines de comparación, se tomará igual tanto en la NTCDV 2017 como en el MDOCDV 2008.

Así mismo, con la información dispuesta, se obtiene la zona eólica a la que pertenece la zona de desplante. A una estructura del Grupo B y según la alcaldía de la Ciudad de México donde se encuentre, le corresponde una Zona Eólica. En este caso y considerando el uso de la NTCDV 2004, la alcaldía Cuauhtémoc se asocia a una Zona I, mientras que con la NTCDV 2017 se asocia a una Zona II. En el caso del MDOCDV 2008, no existe como tal una clasificación eólica. Se debe consultar el mapa de isotacas para determinar la velocidad regional. La Tabla 28 del Capítulo 3.2 de este trabajo, muestra un resumen de las condiciones eólicas y de entorno que se contemplaron en el diseño.

### **Cálculo de los parámetros de diseño por viento empleando la NTCDV 2017**

Basado en las condiciones presentadas en la Tabla 39 y en la Figura 57, es posible obtener constantes que permiten determinar algunos factores como el factor de variación con la altura, el factor de topografía, etc., mismos que a su vez permiten determinar la velocidad y presión de diseño.

Con una configuración del terreno R4 – T3, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.170 \\ \delta &= 455 \text{ m} \\ F_{TR} &= 0.82\end{aligned}$$

Donde, el factor de variación con la altura resulta:

$$F_{\alpha} = \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha} = \left(\frac{45.72 \text{ m}}{10}\right)^{0.170} = 1.295 \quad (4.1)$$

Por lo tanto:

$$V_D = F_{TR} F_{\alpha} V_R = 0.82(1.295) \left(36 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 38.224 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.2)$$

Considerando a la estructura como cerrada, los coeficientes de presión resultan:

$$\begin{aligned}C_{p \text{ barlovento}} &= 0.8 \\ C_{p \text{ sotavento}} &= 0.4 \text{ (succión)}\end{aligned}$$

$$C_p = 0.8 + 0.4 = 1.2 \quad (4.3)$$

Por lo tanto:

$$p_z = 0.048 C_p V_D^2 = 0.048(1.2) \left(38.224 \frac{m}{s}\right)^2 = \mathbf{84.157 \frac{kg}{m^2}} \quad (4.4)$$

Los cálculos anteriores corresponden al método estático definido en la NTCDV 2017. Tanto el valor de la velocidad como de la presión de diseño, ecuaciones 4.2 y 4.4, respectivamente, se utilizarán para el cálculo de algunos factores asociados al método dinámico. El valor de  $C_p$  empleado en la ecuación 4.4 considera los efectos de barlovento y sotavento de forma simultánea. El procedimiento para obtener el factor de amplificación dinámica correspondiente al Edificio 3, es el siguiente:

De igual manera, según la configuración del terreno R4 – T3, es posible obtener los parámetros  $F'_{TR}$ ,  $\bar{d}$ ,  $z_0$ ,  $z_{min}$ ,  $\bar{\alpha}$  y  $\alpha'$ .

$$\begin{aligned} \bar{d} &= 0.43 \\ z_0 &= 1.0 \text{ m} \\ z_{min} &= 10 \text{ m} \\ \alpha' &= 0.29 \\ F'_{TR} &= 0.55 \\ \bar{\alpha} &= 0.67 \end{aligned}$$

En el método dinámico, la altura que se tomará en cuenta para el cálculo de los factores no será la altura total del edificio, será una altura de referencia,  $z_s$ , igual a 0.6 veces la altura total de la estructura. A pesar de que en la NTCDV 2017, la ecuación del factor de variación con la altura para efectos dinámicos,  $F'_\alpha$ , está en función de la altura total de la estructura, el cálculo del factor de amplificación dinámica requiere que se evalúe a una altura de referencia,  $z_s$ .

Como la altura de referencia del Edificio 3, se encuentra en un intervalo de entre 10 y 200 metros y por lo tanto es mayor que  $z_{min}$ , el factor de variación con la altura para efectos dinámicos, el índice de turbulencia y la longitud de escala de turbulencia, se calculan de la siguiente manera:

$$F'_\alpha = 0.702 \left(\frac{z_s}{10}\right)^{\alpha'} = 0.702 \left(\frac{27.432 \text{ m}}{10}\right)^{0.29} = \mathbf{0.941} \quad (4.5)$$

$$I_v(z_s) = \bar{d} \left(\frac{z_s}{10}\right)^{-\alpha'} = 0.43 \left(\frac{27.432 \text{ m}}{10}\right)^{-0.67} = \mathbf{0.321} \quad (4.6)$$

$$L(z_s) = 300 \left(\frac{z_s}{200}\right)^{\bar{\alpha}} = 300 \left(\frac{27.432 \text{ m}}{200}\right)^{0.67} = \mathbf{79.262} \quad (4.7)$$

Por lo tanto, la velocidad media del viento para efectos dinámicos resulta:

$$V'_D(z_s) = F'_{TR} F'_\alpha V_R = 0.55(0.941) \left(36 \frac{m}{s}\right) = \mathbf{18.625 \frac{m}{s}} \quad (4.8)$$

Ahora es posible calcular los factores restantes, ya que están en función de la velocidad para efectos dinámicos y de la longitud de escala de turbulencia principalmente, además de estar en función de las dimensiones ancho y alto de la estructura, por mencionar algunos. Por lo que, el procedimiento es el siguiente:

$$S_L = \frac{6.8 \left( \frac{n_0 L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)}{\left[ 1 + 10.2 \left( \frac{n_0 L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right) \right]^{5/3}} = \frac{6.8 \left( \frac{0.709(79.262)}{18.625 \text{ m/s}} \right)}{\left[ 1 + 10.2 \left( \frac{0.709(79.262)}{18.625 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) \right]^{5/3}} = \mathbf{0.064} \quad (4.9)$$

$$\eta_h = \frac{4.6 h n_0}{V'_D(z_s)} = \frac{4.6(45.72 \text{ m})(0.709 \text{ Hz})}{18.625 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \mathbf{8.006 \text{ Hz}} \quad (4.10)$$

$$\eta_b = \frac{4.6 b n_0}{V'_D(z_s)} = \frac{4.6(40.74 \text{ m})(0.709 \text{ Hz})}{18.625 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \mathbf{7.099 \text{ Hz}} \quad (4.11)$$

Como las frecuencias reducidas resultaron mayor a la unidad, los parámetros de admitancia aerodinámica se calculan como sigue:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) = \frac{1}{8.006 \text{ Hz}} - \frac{1}{2(8.006 \text{ Hz})^2} [1 - e^{-2(8.006 \text{ Hz})}] = \mathbf{0.117} \quad (4.12)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) = \frac{1}{7.099 \text{ Hz}} - \frac{1}{2(7.099 \text{ Hz})^2} [1 - e^{-2(7.099 \text{ Hz})}] = \mathbf{0.131} \quad (4.13)$$

Por lo tanto, los valores del factor de respuesta de fondo,  $B^2$  y del factor de respuesta en resonancia,  $R^2$ , se calculan como sigue:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.90 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0.63}} = \frac{1}{1 + 0.90 \left[ \frac{40.74 \text{ m} + 45.72 \text{ m}}{79.262} \right]^{0.63}} = \mathbf{0.513} \quad (4.14)$$

$$R^2 = \frac{\pi}{4 \zeta_{est}} S_L R_h R_b = \frac{\pi}{4(0.02)} (0.064)(0.117)(0.131) = \mathbf{0.039} \quad (4.15)$$

De este modo, la tasa media de fluctuación y el factor pico de respuesta máxima,  $v$  y  $g$ , respectivamente, adquieren los siguientes valores:

$$v = n_0 \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 0.709 \text{ Hz} \sqrt{\frac{0.039}{0.513 + 0.039}} = \mathbf{0.188 \text{ Hz}} \quad (4.16)$$

$$g = \sqrt{2 \ln(600 \nu)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(600 \nu)}} = \sqrt{2 \ln[(600 \text{ s})(0.188 \text{ Hz})]} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln[(600 \text{ s})(0.188 \text{ Hz})]}} = \mathbf{3.269} \quad (4.17)$$

Finalmente, el factor de amplificación dinámica correspondiente al Edificio 3 es el siguiente:

$$F_{AD} = 1 + 2 g I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2} = 1 + 2(3.269)(0.321) \sqrt{0.513 + 0.039} = \mathbf{2.559} \quad (4.18)$$

Para conocer el valor de las presiones dinámicas actuantes en la estructura, se afecta el valor de la presión de diseño calculada con la ecuación 4.4, primero por el factor transformante,  $F_{TF}$ , para finalmente afectarlo por el FAD asociado a la estructura.

Por lo tanto:

$$P_{z \text{ Ajust}} = p_z F_{TF} = p_z \left( \frac{1}{1 + 7 I_v(z_s)} \right) = 84.157 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \left( \frac{1}{1 + 7(0.321)} \right) = \mathbf{25.924 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \quad (4.19)$$

$$P_{z \text{ Din}} = P_{z \text{ Ajust}} G = 25.924 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} (2.559) = \mathbf{66.329 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \quad (4.20)$$

### Diseño del modelo digital del edificio en SAP2000

Producto de un análisis iterativo de las dimensiones de los elementos geométricos y de la configuración en planta del edificio, con la finalidad de proporcionar al modelo digital una frecuencia natural de vibrar igual o aproximada al del Edificio 3 (0.709 Hz), se obtuvieron los siguientes resultados:

- *Dimensiones de entrespiso y en planta.* La altura de los entrespisos fue adecuada de tal manera que, la altura total se aproxime o sea igual a la que posee el Edificio 3. La configuración en planta, se manejó de igual manera que con la altura de los entrespisos. Se buscó la manera de no tener claros muy largos y que, basado en los procesos de construcción, no representara una dificultad técnica. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 40.

**Tabla 40 Características de entrepisos y dimensiones de claros correspondientes a un plano longitudinal**

Entrepiso	H [m]	$H_{acumulada}$ [m]	Plano	L [m]	Secciones #	$L_{total}$ [m]
1	3	3	X-Z	4.5	9	40.5
2	2.5	5.5	Y-Z	5.8	12	69.6
3	2.5	8	B (X-Z)	-	-	40.54
4	2.5	10.5	ML (Y-Z)	-	-	69.8
5	2.5	13				
6	2.5	15.5				
7	2.5	18				
8	2.5	20.5				
9	2.5	23				
10	2.5	25.5				
11	2.5	28				
12	2.5	30.5				
13	2.5	33				
14	2.5	35.5				
15	2.5	38				
16	2.5	40.5				
17	2.5	43				
18	2.5	45.5				
<b>Hreal</b>		<b>45.72</b>				

- *Secciones de trabes, vigas y columnas.* La sección de las columnas, trabes y vigas de concreto se ajustaron para lograr la rigidez adecuada que genere una frecuencia natural de vibración similar a la del Edificio 3, con una geometría física y técnicamente posible, es decir, no se manejaron secciones inmensas o demasiado pequeñas mismas que su construcción representara una complejidad adicional. Finalmente, considerando un posible proceso de construcción, la dimensión de las columnas disminuye con la altura del edificio por la distribución de cargas de los entrepisos. Los resultados se muestran en la Tabla 41. Las conexiones entre los elementos estructurales se suponen empotradas ya que se trata de una unión monolítica, es decir, representa un colado único de concreto en todos los elementos.



**Tabla 41 Características geométricas de los elementos estructurales**

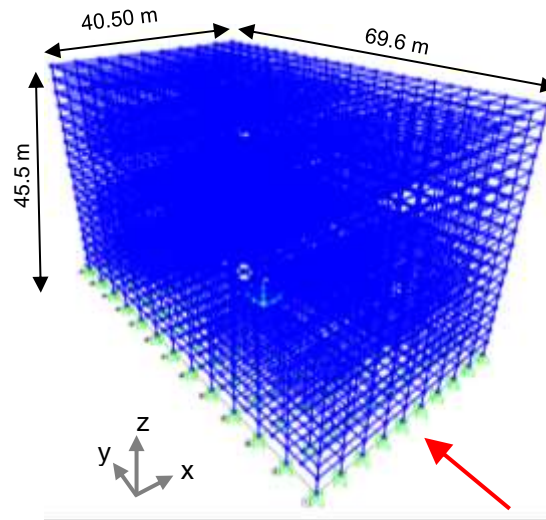
Secciones	b [m]	h [m]	Niveles
C1	0.8	0.8	1 - 10
C2	0.7	0.7	11 - 15
C3	0.6	0.6	16 - 18
TP 1	0.45	0.7	1 - 5
TP 2	0.4	0.7	6 - 10
TP 3	0.37	0.7	11 - 15
TP 4	0.35	0.7	16 - 17
TP 5	0.3	0.5	18
TC 1	0.45	0.7	1 - 5
TC 2	0.42	0.7	6 - 10
TC 3	0.39	0.7	11 - 15
TC 4	0.37	0.7	16 - 17
TC 5	0.3	0.5	18
V sec	0.2	0.4	todos
Mortero	-	0.03	todos
Losa	-	0.12	todos

- *Características del material.* El material seleccionado fue el establecido en la base de datos de edificios, donde el Edificio 3 posee un coeficiente de amortiguamiento asociado al concreto, de esta manera se asignó un valor del peso volumétrico aproximado del concreto y una resistencia estándar mostrados en la Tabla 42

**Tabla 42 Especificaciones generales del material de construcción**

Material	Peso Vol. t/m <sup>3</sup>	f'c kg/cm <sup>2</sup>
Concreto	2.4028	250
Mortero	2	250

- *Condiciones de empotramiento en la base.* La interacción suelo-estructura corresponde a un empotramiento, es decir, el movimiento de la base del edificio está restringido en dirección "X", "Y", "Z" al igual que el giro en todas sus direcciones. Se considera una transmisión de momentos directamente al suelo.
- *Incidencia del viento.* La dirección del viento que se consideró es, según el sistema de referencia de SAP2000, en dirección "Y" sobre el plano "X-Z". La Figura 58, muestra la dirección del viento considerada en el modelo digital.



**Figura 58 Isométrico del modelo digital en SAP2000 con la incidencia del viento indicada**

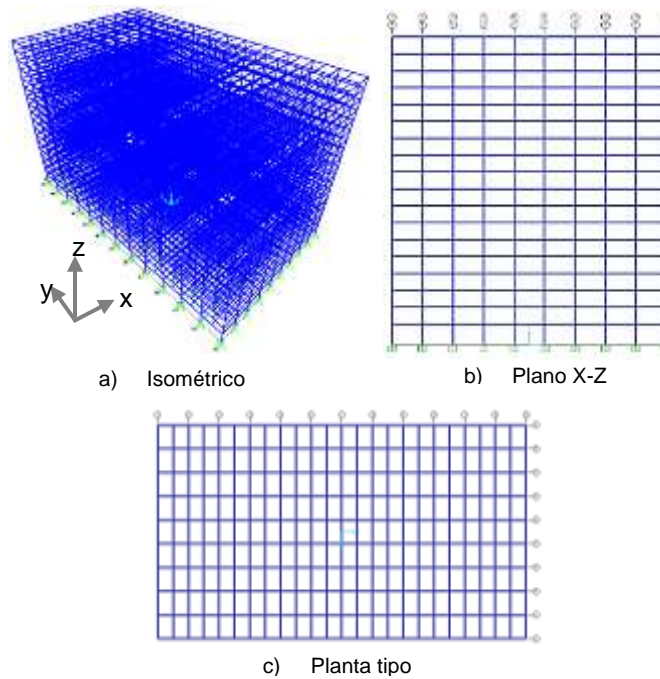
- **Cargas de entrepiso.** Dado el uso del Edificio 3, se consideraron las cargas vivas y accidentales correspondientes a un edificio de oficinas. Dichas cargas se muestran en la Tabla 6.1.1 de la NTC para diseño por sismo, mismos que se muestran a continuación:

$$C_V = 100 \frac{kg}{m^2} \quad (4.21)$$

$$C_{VA} = 180 \frac{kg}{m^2} \quad (4.22)$$

$$C_{VMax} = 250 \frac{kg}{m^2} \quad (4.23)$$

- **Modelo del Edificio 3 en SAP2000.** Todas las características y propiedades de los elementos estructurales fueron asignadas a un modelo digital en SAP2000, de modo que, el resultado final fue un “esqueleto” definido por columnas y trabes (figura 59-a). A los nodos y sobre el plano donde incidirá el viento, se asignaron las fuerzas correspondientes a cada una de las NTCDV (2004 y 2017), considerando áreas tributarias. Las presiones y fuerzas se muestran en las Tablas 43 y 44.



**Figura 59 Distintas vistas del modelo digital en SAP2000 del Edificio 3**

**Tabla 43 Valores de las fuerzas estáticas y dinámicas aplicadas en los nodos del modelo (NTCDV , 2004)**

Nivel	NTCDV 2004		Nodos extremos		Nodos centrales	
	z [m]	$p_z$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$F_{estática}$ [ton]	$F_{dinámica}$ [ton]	$F_{estática}$ [ton]	$F_{dinámica}$ [ton]
1	3	50.194	0.480	0.595	0.960	1.191
2	5.5	50.194	0.282	0.350	0.565	0.700
3	8	50.194	0.282	0.350	0.565	0.700
4	10.5	51.034	0.287	0.356	0.574	0.712
5	13	54.878	0.309	0.383	0.617	0.766
6	15.5	58.260	0.328	0.406	0.655	0.813
7	18	61.298	0.345	0.428	0.690	0.855
8	20.5	64.070	0.360	0.447	0.721	0.894
9	23	66.626	0.375	0.465	0.750	0.930
10	25.5	69.005	0.388	0.481	0.776	0.963
11	28	71.234	0.401	0.497	0.801	0.994
12	30.5	73.336	0.413	0.512	0.825	1.023
13	33	75.327	0.424	0.526	0.847	1.051
14	35.5	77.221	0.434	0.539	0.869	1.078
15	38	79.028	0.445	0.551	0.889	1.103
16	40.5	80.759	0.454	0.563	0.909	1.127
17	43	82.420	0.464	0.575	0.927	1.150
18	45.5	84.019	0.236	0.293	0.473	0.586

**Tabla 44 Valores de las fuerzas estáticas y dinámicas aplicadas en los nodos del modelo (NTCDV, 2017)**

Nivel	NTCDV 2017		Nodos extremos		Nodos centrales	
	z [m]	$p_z$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$F_{estática}$ [ton]	$F_{dinámica}$ [ton]	$F_{estática}$ [ton]	$F_{dinámica}$ [ton]
1	3	50.194	0.480	0.378	0.960	0.757
2	5.5	50.194	0.282	0.223	0.565	0.445
3	8	50.194	0.282	0.223	0.565	0.445
4	10.5	51.034	0.287	0.226	0.574	0.453
5	13	54.878	0.309	0.243	0.617	0.487
6	15.5	58.260	0.328	0.258	0.655	0.517
7	18	61.298	0.345	0.272	0.690	0.544
8	20.5	64.070	0.360	0.284	0.721	0.568
9	23	66.626	0.375	0.295	0.750	0.591
10	25.5	69.005	0.388	0.306	0.776	0.612
11	28	71.234	0.401	0.316	0.801	0.632
12	30.5	73.336	0.413	0.325	0.825	0.650
13	33	75.327	0.424	0.334	0.847	0.668
14	35.5	77.221	0.434	0.342	0.869	0.685
15	38	79.028	0.445	0.350	0.889	0.701
16	40.5	80.759	0.454	0.358	0.909	0.716
17	43	82.420	0.464	0.365	0.927	0.731
18	45.5	84.019	0.236	0.186	0.473	0.372

Finalmente, el procedimiento siguiente es la ejecución del modelo con todas las fuerzas tanto asociadas al método estático como al método dinámico, considerando las NTCDV 2004 y 2017, para determinar los desplazamientos correspondientes y así realizar una comparación entre los resultados.

#### 4.1 Análisis y comparación de resultados

Resultado de la ejecución del modelo digital en SAP2000, considerando las dos ediciones de la NTCDV (2004 y 2017), se obtuvo lo siguiente:

- Frecuencia y periodos de vibración.
- Desplazamientos y distorsiones de entrepiso.

*Frecuencia y periodos de vibración.* Parte del objetivo del modelo digital del Edificio 3, es obtener una frecuencia natural de vibración similar o exactamente igual al indicado en la base de datos de edificios. Como resultado de las iteraciones, que permitieron establecer la geometría de los elementos estructurales y la configuración final en planta, se obtuvo la Tabla 45.

**Tabla 45 Frecuencia y periodos de vibración del modelo**

Modo	T [s]	f [Hz]	w [rad/s]	w2 [rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
1	1.415	0.707	4.442	19.731
2	1.310	0.763	4.795	22.992
3	1.248	0.801	5.034	25.338
4	0.492	2.034	12.782	163.375
5	0.457	2.191	13.764	189.436
6	0.437	2.289	14.380	206.788
7	0.287	3.479	21.862	477.958
8	0.265	3.767	23.667	560.105
9	0.256	3.910	24.568	603.596
10	0.202	4.962	31.179	972.104
11	0.188	5.331	33.495	1121.948
12	0.180	5.545	34.841	1213.922
13	0.171	5.836	36.667	1344.465
14	0.167	5.989	37.628	1415.835
15	0.162	6.181	38.834	1508.097
16	0.160	6.242	39.221	1538.318
17	0.158	6.331	39.778	1582.291
18	0.152	6.583	41.362	1710.835

La frecuencia del Modo 1, correspondiente a la frecuencia natural de vibración de la estructura, resultó con un valor de 0.707 Hz, aproximado al valor de 0.709 Hz buscado, por lo que se trata de un resultado adecuado para considerar que el modelo es correcto. El porcentaje de error es el siguiente:

$$\%E = \frac{0.709 \text{ Hz} - 0.707 \text{ Hz}}{0.709 \text{ Hz}} \times 100 = \mathbf{0.28\%} \quad (4.24)$$

*Desplazamientos y distorsiones de entrepiso.* Las fuerzas tanto estáticas como dinámicas equivalentes, que fueron asignadas al modelo calibrado, generaron un conjunto de desplazamientos que serán comparados con los desplazamientos permisibles definidos en las NTCDV 2004 y 2017. Las Tablas 46 y 47, muestran los resultados del análisis en SAP2000.

**Tabla 46 Desplazamientos y distorsiones de entrepiso provocados por las fuerzas del viento en el modelo (NTCDV, 2004)**

Nivel	NTCDV 2004 (Estático)			NTCDV 2004 (Dinámico)		
	F [ton]	$\delta$	Distorsión	F [ton]	$\delta$	Distorsión
1	8.640	0.00008	0.00008	10.717	0.00011	0.00011
2	5.082	0.00019	0.00011	6.304	0.00024	0.00014
3	5.082	0.00031	0.00012	6.304	0.00038	0.00014
4	5.167	0.00042	0.00011	6.409	0.00052	0.00014
5	5.556	0.00053	0.00011	6.892	0.00066	0.00013
6	5.899	0.00064	0.00011	7.317	0.00079	0.00013
7	6.206	0.00074	0.00010	7.698	0.00091	0.00013
8	6.487	0.00083	0.00010	8.047	0.00103	0.00012
9	6.746	0.00092	0.00009	8.368	0.00114	0.00011
10	6.987	0.00100	0.00008	8.666	0.00124	0.00010
11	7.212	0.00108	0.00008	8.946	0.00134	0.00010
12	7.425	0.00115	0.00007	9.210	0.00143	0.00009
13	7.627	0.00122	0.00006	9.460	0.00151	0.00008
14	7.819	0.00127	0.00005	9.698	0.00158	0.00007
15	8.002	0.00131	0.00004	9.925	0.00163	0.00005
16	8.177	0.00135	0.00004	10.143	0.00167	0.00005
17	8.345	0.00137	0.00002	10.351	0.00170	0.00003
18	4.253	0.00139	0.00002	5.276	0.00172	0.00002

**Tabla 47 Desplazamientos y distorsiones de entrepiso provocados por las fuerzas del viento en el modelo (NTCDV, 2017)**

Nivel	NTCDV 2017 (Estático)			NTCDV 2017 (Dinámico)		
	F [ton]	$\delta$	Distorsión	F [ton]	$\delta$	Distorsión
1	8.640	0.00008	0.00008	6.809	0.00007	0.00007
2	5.082	0.00019	0.00011	4.006	0.00015	0.00009
3	5.082	0.00031	0.00012	4.006	0.00024	0.00009
4	5.167	0.00042	0.00011	4.073	0.00033	0.00009
5	5.556	0.00053	0.00011	4.379	0.00042	0.00009
6	5.899	0.00064	0.00011	4.649	0.00050	0.00008
7	6.206	0.00074	0.00010	4.892	0.00058	0.00008
8	6.487	0.00083	0.00010	5.113	0.00066	0.00008
9	6.746	0.00092	0.00009	5.317	0.00072	0.00007
10	6.987	0.00100	0.00008	5.507	0.00079	0.00006
11	7.212	0.00108	0.00008	5.685	0.00085	0.00006
12	7.425	0.00115	0.00007	5.852	0.00091	0.00006
13	7.627	0.00122	0.00006	6.011	0.00096	0.00005
14	7.819	0.00127	0.00005	6.162	0.00100	0.00004
15	8.002	0.00131	0.00004	6.307	0.00103	0.00003
16	8.177	0.00135	0.00004	6.445	0.00106	0.00003
17	8.345	0.00137	0.00002	6.577	0.00108	0.00002
18	4.253	0.00139	0.00002	3.352	0.00110	0.00001

Como el factor de amplificación dinámica, correspondiente a la NTCDV 2017, redujo el valor de las presiones y por lo tanto de las fuerzas, los resultados reflejaron una reducción en comparación con los desplazamientos asociados a las fuerzas estáticas. Para identificar la magnitud de los cambios, la Tabla 48 muestra la diferencia entre los desplazamientos generados por las fuerzas estáticas y los generados por las fuerzas dinámicas de la NTCDV 2004, al igual que con la NTCDV 2017. Por último, se hace una comparación de únicamente los desplazamientos asociados a las fuerzas dinámicas empleando la NTCDV 2004 y la del 2017 (tabla 49).

**Tabla 48 Comparación de los desplazamientos resultantes de las NTCDV 2004 y 2017**

Nivel	NTCDV 2004		%	NTCDV 2017		%
	$\delta_{estático}$	$\delta_{dinámico}$		$\delta_{estático}$	$\delta_{dinámico}$	
1	0.00008	0.00011	25.00	0.00008	0.00007	-21.43
2	0.00019	0.00024	24.23	0.00019	0.00015	-21.13
3	0.00031	0.00038	23.95	0.00031	0.00024	-21.36
4	0.00042	0.00052	24.23	0.00042	0.00033	-21.14
5	0.00053	0.00066	23.96	0.00053	0.00042	-21.13
6	0.00064	0.00079	24.09	0.00064	0.00050	-21.26
7	0.00074	0.00091	24.05	0.00074	0.00058	-21.20
8	0.00083	0.00103	24.07	0.00083	0.00066	-21.18
9	0.00092	0.00114	24.05	0.00092	0.00072	-21.22
10	0.00100	0.00124	24.00	0.00100	0.00079	-21.20
11	0.00108	0.00134	24.05	0.00108	0.00085	-21.18
12	0.00115	0.00143	24.11	0.00115	0.00091	-21.16
13	0.00122	0.00151	23.99	0.00122	0.00096	-21.20
14	0.00127	0.00158	24.11	0.00127	0.00100	-21.12
15	0.00131	0.00163	24.09	0.00131	0.00103	-21.19
16	0.00135	0.00167	24.00	0.00135	0.00106	-21.19
17	0.00137	0.00170	24.02	0.00137	0.00108	-21.18
18	0.00139	0.00172	24.03	0.00139	0.00110	-21.22



**Tabla 49 Comparación entre los desplazamientos asociados a las fuerzas dinámicas de la NTCDV 2004 y la NTCDV 2017**

Nivel	NTCDV 2004 $\delta_{dinámico}$	NTCDV 2017 $\delta_{dinámico}$	% cambio
1	0.00011	0.00007	-37.14
2	0.00024	0.00015	-36.51
3	0.00038	0.00024	-36.55
4	0.00052	0.00033	-36.52
5	0.00066	0.00042	-36.38
6	0.00079	0.00050	-36.55
7	0.00091	0.00058	-36.47
8	0.00103	0.00066	-36.47
9	0.00114	0.00072	-36.49
10	0.00124	0.00079	-36.45
11	0.00134	0.00085	-36.47
12	0.00143	0.00091	-36.48
13	0.00151	0.00096	-36.45
14	0.00158	0.00100	-36.44
15	0.00163	0.00103	-36.49
16	0.00167	0.00106	-36.44
17	0.00170	0.00108	-36.44
18	0.00172	0.00110	-36.48

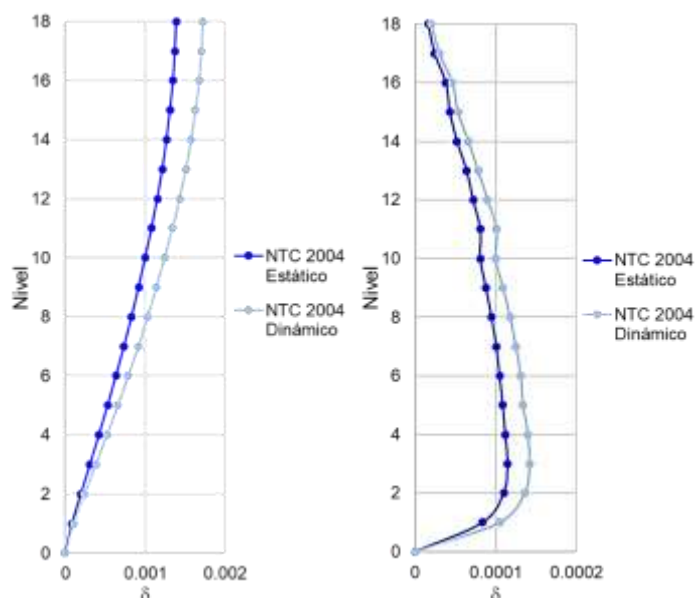
Una característica de los porcentajes de cambio mostrados en la Tabla 48, es que cada uno de los niveles presentó un incremento similar tanto en la NTCDV 2004 como en la del 2017, mientras que, con respecto a los desplazamientos asociados a las fuerzas dinámicas de ambas versiones de las normas, el decremento es similar en cada uno de los niveles.

En promedio, con la NTCDV 2004, los desplazamientos dinámicos representan un incremento del 24% más con respecto a los generados con las fuerzas estáticas. Con la NTCDV 2017, los desplazamientos asociados a las fuerzas dinámicas representan un decremento del 21% con respecto a los generados por las fuerzas estáticas.

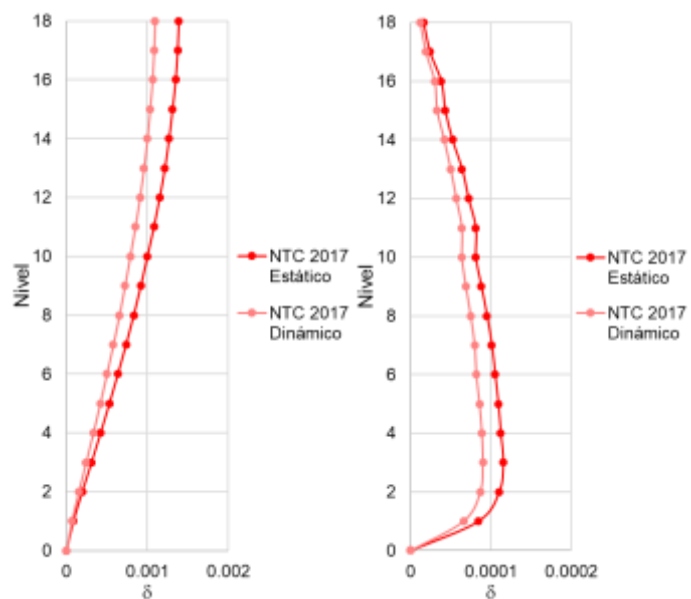
Finalmente, entre los desplazamientos correspondientes a las fuerzas dinámicas de ambas normas, se presentó un decremento del 36% aproximadamente (tabla 49).

En todos los niveles se presentan diferencias similares a pesar de la variación de los valores del factor de amplificación dinámica de las NTCDV (2004 y 2017). En el caso de la NTCDV 2017, con las fuerzas afectadas por su respectivo FAD, se reducen los desplazamientos en comparación con los resultados de la NTCDV 2004. Esto se debe principalmente a que, en las ecuaciones presentes en el método dinámico, la altura de referencia, misma que es un 60% menor que la altura total de la estructura, influye directamente con la reducción de los factores que se emplean para determinar la respuesta dinámica de la acción del viento.

Tanto la NTCDV 2004 como la del 2017, establecen el mismo límite de desplazamientos permisibles, los cuales, para estructuras con elementos de relleno susceptibles a daños importantes debidos a deformaciones angulares, es de 0.002 y, de 0.005 cuando no existen dichos elementos. Por lo tanto, tomando en cuenta el desplazamiento máximo del Edificio 3, no se rebasó el límite establecido. La condición más desfavorable se presentó con los desplazamientos debidos a las fuerzas resultantes del método dinámico empleando la NTCDV 2004, donde el desplazamiento máximo fue cercano al límite, con un valor de 0.0017, si se considera a la estructura con elementos susceptibles a daños debidos a deformaciones angulares, donde el límite permisible es de 0.002.



**Figura 60 Gráficas comparativas de los desplazamiento (izq) y de distorsiones de entrepiso (der) (NTCDV 2004)**



**Figura 61 Gráficas comparativas de los desplazamiento (izq) y de distorsiones de entrepiso (der) (NTCDV 2017)**

## Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El cambio más significativo que presentó la NTCDV fue principalmente la magnitud del valor del factor de amplificación dinámica, mismo que representó una reducción en las presiones de diseño para efectos dinámicos. Tal como se identificó, la reducción aparente fue en promedio, del 32% aproximadamente con respecto a las presiones de diseño afectadas por el FAD determinado con la NTCDV 2004. Mientras que, en términos de amplificación, el FAD calculado con la NTCDV 2017 amplifica las presiones en más del doble, tomando en cuenta que la ecuación fue separada y el factor transformante aplicado a las presiones estáticas antes de afectarlas por el FAD. Sin embargo, a pesar de duplicar la magnitud de las presiones, estas son menores que las presiones determinadas con el método estático de la NTCDV 2004, con lo que, en conclusión, la metodología de diseño adoptada en la NTCDV 2017 permite optimizar las fuerzas a las que será sometida la estructura, sin sobreestimar los efectos dinámicos del viento a diferencia de los resultados obtenidos con la NTCDV 2004, que reflejan valores más conservadores. Además, se observó que el material del que estén compuestos los edificios, influirá de manera directa en la respuesta dinámica de la acción del viento, como lo fue el Edificio 2 y 8 de la base de datos de edificios, mismos que están compuestos por acero y que arrojaron valores fuera de la tendencia con respecto a los demás edificios de concreto.

### *Recomendaciones*

Las siguientes recomendaciones, están listadas en orden de importancia según su impacto:

- Se recomienda que, previo a la publicación tanto de las NTCDV, así como de cualquier otra normativa de diseño o reglamento de construcción, se verifique y se respete la estructura del documento elaborado por las dependencias o instituciones encargadas de los aspectos técnicos y analíticos, tal como lo fue el Instituto de Ingeniería, que elaboró y revisó las modificaciones a las NTCDV. Al modificarlos, se corre el riesgo de omitir desde ciertos caracteres o símbolos hasta especificaciones o expresiones necesarias para realizar los cálculos pertinentes, como fue el caso de la NTCDV 2017. Dado que se trata de un documento oficial, es necesario que se maneje la información con absoluta cautela y con una supervisión adecuada para evitar errores futuros.
- Es necesario dar a conocer las omisiones que fueron identificadas en la edición del documento final publicado en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, derivado de la elaboración de este trabajo de investigación, con la finalidad de concientizar al área administrativa encargada de las publicaciones oficiales, así como al público en general que pueda utilizar dicho documento para fines tanto técnico – profesionales como académicos.
- Debido a la importancia y a la gran influencia que tiene el MDOCDV 2008 en México y, ya que la NTCDV 2017 son un extracto del mismo, actualmente se tienen dos normativas de diseño por viento prácticamente iguales, por lo que, se recomienda evaluar la posibilidad de sustituir a las NTCDV por el MDOCDV en las futuras modificaciones. El objetivo es establecer al MDOCDV, como el principal referente de diseño por viento en México, tal

como lo son los códigos internacionales como el Eurocódigo o el Código Canadiense, por mencionar algunos.

- Dado que algunos de los factores del método dinámico de la NTCDV 2017 están en función de la velocidad media para efectos dinámicos,  $V'_D$ , evaluada a una altura de referencia,  $z_s$ , misma que, tal como está expresado, representa el 60 % de la altura total de la estructura, se recomienda especificar en la ecuación del factor de variación con la altura para efectos dinámicos,  $F'_\alpha$ , la variable  $z_s$ , ya que actualmente está en función de la altura,  $z$ . Esto, a pesar de que es posible inferir la manera de evaluar a la velocidad media para efectos dinámicos a una altura de referencia,  $z_s$ , puede ocasionar confusiones al momento de querer identificar la variable  $V'_D(z_s)$  presente en algunos parámetros. De esta manera, todos aquellos con o sin experiencia que requieran el uso de la NTCDV 2017, podrán obtener resultados con una mayor confiabilidad y evitara posibles omisiones en los cálculos.

## REFERENCIAS

- Administración pública de la Ciudad de México. (2016). *Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México*. México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Administración pública de la Ciudad de México. (2017). *Modificaciones a las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México*. México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Administración pública de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento 2017*. México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Administración pública del Distrito Federal. (2004). *Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal: Tomo II*. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Administración pública del Distrito Federal. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento 2004*. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Administración pública del Distrito Federal. (2004). *Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal: Tomo I*. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Aguilar Falconi, R. (2006). *Dinámica de estructuras con Matlab*. Quito: CEINCI-ESPE.
- Avelar Frausto, C. E. (Noviembre de 2017). *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. Obtenido de [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/co/co\\_14/te\\_08/ar\\_11.pdf](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_14/te_08/ar_11.pdf)
- Bazan, E., & Meli, R. (1983). *Manual de diseño sísmico de edificios*. México: Series del Instituto de Ingeniería .
- Bungale S., T. (2005). *Wind and Earthquake Resistant Buildings*. New York : Marcel Dekker.
- Canadian Commission on Building and Fire Codes. (2015). *National Building Code of Canada 2015*. Canada: National Research Council of Canada.
- Chopra K., A. (2014). *Dinámica de estructuras*. México: Pearson Education, Inc.
- Clough W, R., & Penzien, J. (1995). *Dynamics of structures*. Berkeley, CA: Computers & Structures, Inc.
- Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles 2008: Diseño por Viento* . México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Den Hartog, J. P. (1969). *Mecánica de las vibraciones*. New York: McGraw Hill Book Company, Inc.
- Dyrbye, C., & Ole Hansen, S. (1989). *Wind loads on structures* . USA: John Wiley & Sons, Inc.
- E. Gordon , J. (1978). *Structures or why things don't fall down*. England: Penguin Books Ltd.

- Eurocode 1. (2005). *Actions on structures - Part 1-4: Wind Actions*. The European Union: European Committee for Standardization.
- Garnett Davenport, A. (1967). Gust loading factors. *Journal of the Structural Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 11-34.
- Instituto de Ingeniería UNAM. (1977). *Diseño y construcción de estructuras de concreto*. México: Series del Instituto de Ingeniería.
- Instituto de Ingeniería UNAM. (1992). *Comentarios, ayudas de diseño y ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento, DDF*. México: Series del Instituto de Ingeniería.
- International Centre for Mechanical Sciences. (2007 Courses and Lectures No. 493). Courses and Lectures No. 493. En T. Stathopoulos, & C. C. Baniotopoulos, *Wind effects on buildings and design of wind-sensitive structures* (págs. 1-234). Italy: SpringerWien New York.
- Lima Castillo, I. F. (2012). *Diseño óptimo de edificios sensibles al viento, considerando formulaciones simplificadas de daño*. México: Tesis de Maestría.
- MDOCDV. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento*. México: Instituto de Investigaciones Técnicas.
- Meli, R. (s.f.). *Diseño Estructural*. México: LIMUSA.
- NBCC. (2015). *Wind Loads Provisions*. Canada: National Research Council of Canada.
- NTCDV. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento*. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- Paz, M. (1992). *Dinámica estructural, teoría y cálculo*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Pérez León, A. Y. (2016). *Comparación de la respuesta estructural inducida por el viento empleando normatividad y simulación*. México: Tesis de Licenciatura.
- Pulmig. (Noviembre de 2018). *Blogspot*. Obtenido de <http://cuelab83.blogspot.com/2005/10/lo-que-el-viento-se-llevo-con-el.html>
- Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Rodríguez Cuevas, N. (1969). *Desplazamiento de estructuras simples bajo la acción de vientos máximos registrados en la Ciudad de México*. México: Instituto de Ingeniería.
- Simiu, E. (2006). *Design of buildings for wind: a guide for ASCE 7-10 standard users and designers of special structures*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Simiu, E., & H. Scanlan, R. (1996). *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

- Stafford Smith, B., & Coull, A. (1991). *Tall building structures: Analysis and design*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- The European Union Per Regulation . (1991). *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*. The European Union: European Committee for Standardization .
- Velasco J., J. (Noviembre de 2018). *Hipertextual*. Obtenido de <https://hipertextual.com/2012/02/puente-de-tacoma-viento-resonancia>
- Villarreal Castro, G. (2016). *Curso breve de dinámica estructural*. Lima-Perú: Editora & Imprenta Gráfica Norte S.R.L.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- ❖ <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/302917.html>
- ❖ [http://www.cires.org.mx/1985\\_es.php](http://www.cires.org.mx/1985_es.php)
- ❖ [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/co/co\\_14/te\\_08/ar\\_11.pdf](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_14/te_08/ar_11.pdf)
- ❖ <https://hipertextual.com/2012/02/puente-de-tacoma-viento-resonancia>
- ❖ <http://cuelab83.blogspot.com/2005/10/lo-que-el-viento-se-llevo-con-el.html>



## ANEXO

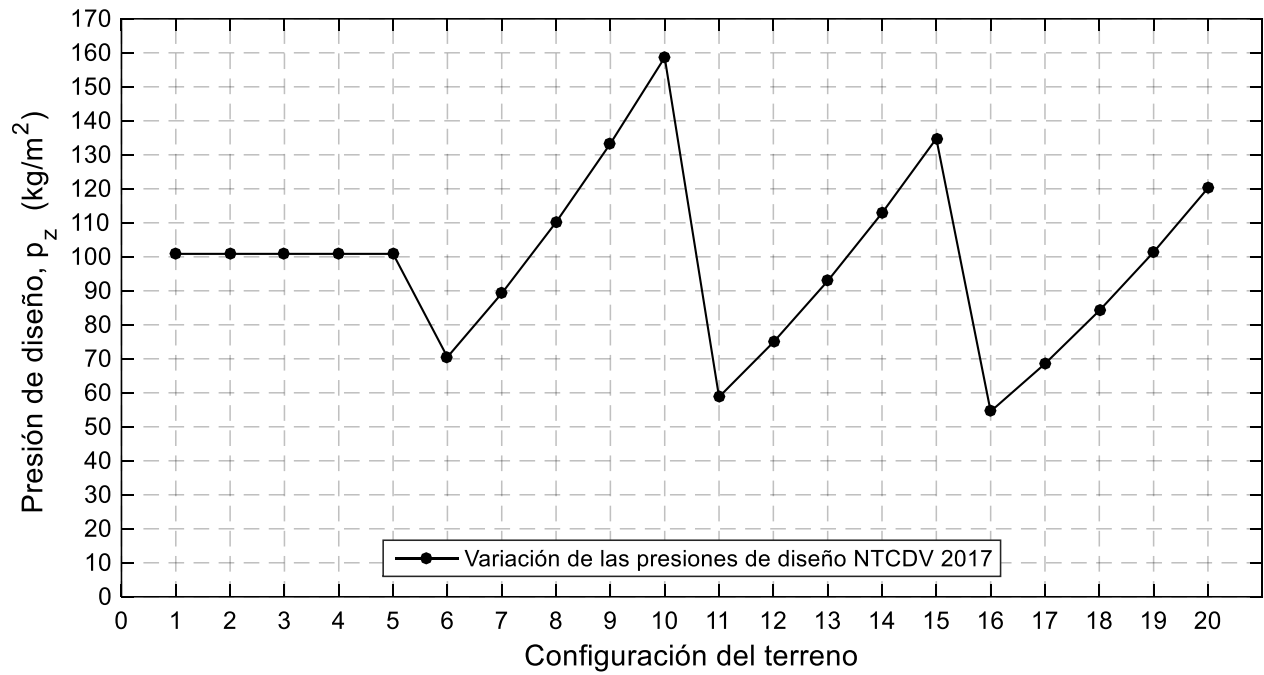
*Variación de la presión de diseño con base en la configuración del terreno.*

En este anexo se muestran los valores de las presiones de diseño de la NTCDV 2017, contemplando cada una de las configuraciones posibles del terreno (R1 – T1, R2 – T1, ..., R4 – T4). Para obtener dichos valores, se seleccionó el Edificio 3.

En total se tienen 20 configuraciones del terreno posibles, donde 5 de ellas arrojan los mismos resultados y están asociados a un terreno con rugosidad tipo R1, mismo que corresponde a un terreno prácticamente plano. La NTCDV 2017 especifica que una categoría del terreno tipo R1, sin importar el tipo de topografía, ya sea T1, T2, T3, T4 o T5, el factor de topografía y rugosidad,  $F_{TR}$ , será igual a la unidad en todos los casos. La Tabla 50, muestra los valores de la presión según la configuración del terreno y la Figura 62 muestra gráficamente el comportamiento de las presiones con cada configuración, donde los mayores resultados se presentan con una categoría del terreno R2, terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.

**Tabla 50 Valores de  $p_z$  asociados a una configuración del terreno (método estático)**

Config	Terreno	$P_z$ $kg/m^2$
1	R1 - T1	100.86
2	R1 - T2	100.86
3	R1 - T3	100.86
4	R1 - T4	100.86
5	R1 - T5	100.86
6	R2 - T1	70.50
7	R2 - T2	89.23
8	R2 - T3	110.16
9	R2 - T4	133.29
10	R2 - T5	158.63
11	R3 - T1	58.77
12	R3 - T2	74.86
13	R3 - T3	92.89
14	R3 - T4	112.86
15	R3 - T5	134.77
16	R4 - T1	54.52
17	R4 - T2	68.54
18	R4 - T3	84.16
19	R4 - T4	101.38
20	R4 - T5	120.20



**Figura 62** Comportamiento de la presión de diseño,  $p_z$ , asociado a una configuración del terreno establecida

