



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil – Estructuras

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA  
ACELERACIÓN TRANSVERSAL INDUCIDA POR EL VIENTO EN  
EDIFICIOS ALTOS: UNA PROPUESTA NORMATIVA PARA  
MÉXICO**

**TESIS**

Que para optar por el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

Presenta:

**ING. DANIEL CORONA GONZALEZ**

Tutor:

Dr. Adrián Pozos Estrada

Instituto de Ingeniería UNAM

Ciudad de México, México, 2023

---



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO**

Presidente	Dr. José Alberto Escobar Sánchez
Secretario	Dr. Roberto Gómez Martínez
1 <sup>er</sup> Vocal	Dr. Adrián Pozos Estrada
2 <sup>do</sup> Vocal	Dr. Orlando Javier Díaz López
3 <sup>er</sup> Vocal	Dr. Héctor Guerrero Bobadilla

Lugar donde se realizó la tesis: **Instituto de Ingeniería de la UNAM.**

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Adrián Pozos Estrada

---

**Firma**

---

---

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a las instituciones que contribuyeron a mi formación profesional: la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, la **División de Estudios de Posgrado en Ingeniería**, al **Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM)** y al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**.

Agradezco al **Dr. Adrián Pozos-Estrada** por la oportunidad de formar parte de su equipo de investigación, la confianza y apoyo depositado para realizar este trabajo.

Igualmente agradezco al **Grupo de Ingeniería de Viento del IIUNAM** quienes de alguna forma transmitieron su calidez, valores y experiencia dentro del equipo.

Agradezco al comité sinodal, el Dr. José Alberto Escobar Sánchez, el Dr. Roberto Gómez Martínez, El Dr. Orlando Javier Díaz López y el Dr. Héctor Guerrero Bobadilla, quienes ayudaron a enriquecer/mejorar este trabajo desde distintos puntos de vista.

Agradezco a los amigos y compañeros que hice durante mi paso por la maestría, saben lo especiales que fueron durante todo este tiempo.

Por último, pero no menos importante, tengo un especial agradecimiento a mis padres y hermana quienes siempre me alentaron y dieron su apoyo para alcanzar esta meta.



## RESUMEN

### *Desarrollo de una metodología para evaluar la aceleración transversal inducida por el viento en edificios altos: una propuesta normativa para México\**

**Ing. Daniel Corona Gonzalez**

**Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2023**

Este trabajo de investigación se lleva a cabo para encontrar una metodología para el cálculo de la aceleración en el sentido transversal causada por el viento en edificios de gran altura aplicable para las condiciones de viento de la Ciudad de México.

Para este fin se hace la revisión de lo desarrollado en otras partes del mundo respecto a este tema, en el caso del continente asiático se realiza la revisión de lo estipulado por el código japonés, en el caso del continente europeo se revisa el Eurocódigo adaptado a la normativa italiana y, por último, para el caso del continente americano se revisa la normativa canadiense. En el desarrollo de estos procedimientos y, para realizar una comparativa más objetiva se aplica un ejemplo de un edificio alto para las tres normativas y se analizan sus resultados, pudiendo obtener las diferencias y detalles más significativos de cada uno para, posteriormente, realizar un análisis para determinar cuál es la que ofrece los resultados más concordantes con la práctica mexicana.

Una vez que se ha elegido a uno de estos procedimientos, se obtienen las gráficas de percepción de aceleración, a través del teorema de probabilidad total para diferentes frecuencias de vibrar, hasta 1 Hertz, así como diferentes probabilidades incondicionales de percepción del movimiento inducido por el viento, es decir, se calculan los factores de aceleración transversal para cada una de estas probabilidades y frecuencias.

Ya con los resultados obtenidos, se procede a realizar un análisis de sensibilidad, para verificar en qué medida afectan, a los factores de aceleración transversal obtenidos, las variaciones de los parámetros que se consideren de interés y que intervengan en el procedimiento, como las dimensiones y características dinámicas del edificio.

Finalmente se presenta un ejemplo de aplicación de un edificio hipotético, en el cual se verifica el nivel de aceleración transversal factorizada que tendrá dicho edificio para diferentes niveles de percepción, los que se comparan contra una aceleración límite permisible obtenida de la curva H50 del AIJ.

---

## ABSTRACT

*Development of a methodology to assess wind-induced transverse acceleration in tall buildings: a normative proposal for Mexico. \**

**Daniel Corona Gonzalez, Eng.**

**Institute of Engineering, UNAM, 2023**

This research work is carried out to find a methodology for the calculation of the transverse acceleration caused by wind in high-rise buildings applicable to the wind conditions of Mexico City.

For this purpose, a review of what has been developed in other parts of the world regarding this subject is made, in the case of the Asian continent a review of what is stipulated by the Japanese code is made, in the case of the European continent the Eurocode adapted to the Italian regulations is reviewed and finally, for the case of the American continent the Canadian regulations are reviewed. In the development of these procedures and in order to make a more objective comparison, an example of a tall building for the three standards is applied and their results are analyzed, being able to obtain the most significant differences and details of each one in order to, finally, make an analysis and determine which one offers the most adequate results.

Once one of these procedures has been chosen, the acceleration perception graphs are obtained through the total probability theorem for different frequencies of movement, up to 1 Hertz and, as well as different unconditional probabilities of perception of the movement induced by the wind, that is, the transverse acceleration factors are calculated for each of these probabilities and frequencies.

Once the results are obtained, a sensitivity analysis is performed to verify to what extent the variations of the parameters involved in the procedure affect the transverse acceleration factors obtained.

Finally, an example of application of a hypothetical building is presented, in which the level of transverse acceleration that the building will have is verified and the values of the acceleration factors for different levels of perception are obtained, comparing them against a permissible limit acceleration.

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Objetivo y metodología.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.5 Alcance y limitaciones.....	3
1.6 Antecedentes .....	4
1.6.1 <i>Manual De Obras Civiles (MDOC-2020)</i> .....	4
<b>CAPÍTULO 2 PERCEPCIÓN HUMANA DE LA ACELERACIÓN</b> .....	<b>6</b>
2.1 Mecanismos de percepción del movimiento.....	7
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LA ACELERACIÓN TRANSVERSAL</b> .....	<b>12</b>
3.1 CÓDIGO ITALIANO CNR-DT 207/2008/ Instrucciones para la evaluación de las acciones del viento y los efectos en del viento en los edificios.....	12
3.1.1 <i>Origen del documento CNR-DT 207/2008</i> .....	12
3.1.2 <i>Base teórica de la respuesta transversal</i> .....	13
3.1.3 <i>Revisión de la aceleración transversal</i> .....	16
3.2 CÓDIGO CANADIENSE: NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA.....	22
3.3 CÓDIGO JAPONÉS: Recommendations for Loads on Buildings (Diciembre 2005) ....	25
3.4 ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS.....	32
<b>CAPÍTULO 4 FORMULACIÓN DE UN FACTOR DE ACELERACIÓN PARA EVALUAR LA ACELERACIÓN TRANSVERSAL INDUCIDA POR EL VIENTO</b> .....	<b>38</b>
4.1 <i>COMPARATIVA DE LAS FUNCIONES DE DENSIDAD ESPECTRAL</i> .....	42

---

---

<b>CAPÍTULO 5 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL FACTOR DE ACELERACIÓN TRANSVERSAL (<math>F_{\sigma T}</math>)</b> .....	<b>46</b>
5.1 MÉTODO NUMÉRICO .....	46
5.1.1 MÉTODO DE BISECCIÓN.....	46
5.2 SIMULACIÓN DE LAS ECUACIONES .....	47
5.2.1 SELECCIÓN DEL INTERVALO DE COEFICIENTES DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD.....	48
5.2.2 RESULTADOS PARA $D/B < 3$ .....	48
5.2.2.1 FACTORES DE ACELERACIÓN TRANSVERSAL .....	52
5.2.3 AJUSTE DE LOS VALORES DE LOS FACTORES DE ACELERACIÓN TRANSVERSAL.....	53
5.3 VERIFICACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS .....	58
5.3.1 VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL EDIFICIO Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....	58
5.3.2 IMPACTO DE LOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN DE $\zeta_T$ , $f_n$ Y $\xi$ EN LOS FACTORES DE ACELERACIÓN .....	59
5.3.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN ( $F_{\sigma T}$ ).....	62
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>65</b>
7.1 CONCLUSIONES .....	65
7.2 TRABAJOS FUTUROS .....	66
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>67</b>

---



## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 – Clase de rugosidad del terreno .....	18
Tabla 3.2 – Valores de los parámetros $k_r$ , $Z_0$ y $Z_{min}$ .....	19
Tabla 3.3.1 Parámetros para determinar $E_g$ .....	26
Tabla 3.3.2 Parámetros para determinar $E_g$ (escarpes) .....	27
Tabla 3.3.3 Parámetros para determinar $E_g$ (topografía en forma de cresta) .....	28
Tabla 3.3.4 Velocidad del viento critica adimensional para la inestabilidad aeroelástica en la dirección transversal del viento, $U_{Lcr}^*$ .....	29
Tabla 3.4.1. Evaluación de ejemplo en las tres metodologías analizadas .....	32
Tabla 3.4.2. Comparación de las aceleraciones del código japonés e italiano .....	34
Tabla 3.4.1.1 Comparativa de valores de la función de densidad espectral para el MDOC y el código italiano .....	43
Tabla 5.2.2.1. Aceleraciones para distintas frecuencias con un coeficiente de variación de la velocidad de 0.10 y $P_{FF}$ de 0.10 .....	49
Tabla 5.2.2.2. Aceleraciones para distintas frecuencias con un coeficiente de variación de la velocidad de 0.20, $P_{fp}$ de 0.90 y altura, H, de 200 metros .....	50
Tabla 5.2.3.1. Parámetros de las ecuaciones 5.2.4.1 y 5.2.4.2 .....	56
Tabla 5.3.3.1 Datos de edificio ejemplo .....	62
Tabla 65.3.3.2. Resultados de los factores de aceleración transversal con $\delta_v$ de 0.1 a 0.25 .....	63
Tabla 5.3.3.3. Resultados de $F_{aT}$ x $a_{pT}$ .....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.6.1 Figura B.4 del MDOC-2020 factor de aceleración ( $F_{At}$ ) en función del porcentaje de personas que perciben la aceleración. ....	5
Figura 1.6.2 Figura B.5 del MDOC-2020: Aceleración crítica ( $a_c$ ) en función de la frecuencia natural de vibrar ( $n_i$ ).....	5
Figura 2.1. Partes del cerebro, vista lateral. ....	7
Figura 2.2 Estructura del oído, en donde se puede observar el oído externo, medio e interno, además del sistema vestibular. ....	8
Figura 2.3 Sistema vestibular.....	9
Figura 2.4. Un simulador de movimiento de doble eje .....	10
Figura 3.1 (a) Modelo simplificado de la circulación atmosférica, (b) El transporte de calor a través de la radiación en la atmósfera. ....	14
Figura 3.2 Cuerpo tridimensional en un campo de viento.....	15
Figura 3.3 Cuerpo bidimensional en un campo de viento.....	15
Figura 3.2.1. Factor de turbulencia de fondo como una función del ancho y el alto de la estructura .....	24
Figura 3.3.1 Escarpes .....	27
Figura 3.3.2 Topografía en forma de cresta .....	27
Figura 3.4.1. Comparativa de las aceleraciones resultantes del código japonés e italiano para un $T_r$ de 1 a 100 años.....	35
Figura 3.4.2. Comparativa de las aceleraciones resultantes del código japonés e italiano para un $T_r$ de 1 a 1000 años. ....	35
Figura 4.1 Variación de $C_1$ y $C_2$ con la frecuencia .....	41
Figura 3.4.1.1 Comparativa de las Funciones de Densidad Espectral del código italiano y el MDOC. ....	45
Fig 5.2.2.1. Gráfica de frecuencia – valor de la aceleración en mili-g para una $P_{fp}$ de 0.10 y un coeficiente de variación de la velocidad de 0.10. ....	49
Fig 5.2.2.2. Gráfica de frecuencia – valor de la aceleración en mili-g para una $P_{fp}$ de 0.90 y un coeficiente de variación de la velocidad de 0.20 y una altura, $H$ , de 200 m, sin ajustar.....	51
Fig 5.2.2.3. Gráfica de frecuencia – valor de la aceleración en mili-g para una $P_{fp}$ de 0.90 y un coeficiente de variación de la velocidad de 0.20 y una altura, $H$ , de 200 m, ajustada. ....	51
Figura 5.2.2.1.1. Factores de aceleración para los distintos $P_{fp}$ .....	52
Figura 5.2.2.1.2. Variación del factor de aceleración transversal con respecto al $P_{fp}$ , para valores de coeficiente de variación de velocidad de 0.10 a 0.25.....	53

---

Figura 5.2.3.1. Línea de tendencia para ajustar las curvas de los factores de aceleración transversal. ....	54
Figura 5.2.3.2. Comportamiento de los valores de la pendiente, $a$ , y de la ordenada al origen, $b$ . ....	55
Figura 5.2.3.3. Ajuste de la curva de la pendiente, $a$ . ....	55
Figura 5.2.3.4. Ajuste de la curva de la pendiente, $b$ . ....	56
Figura 5.2.3.5. Factores de aceleración transversal, $F_{aT}$ , ajustados. ....	57
Figura 5.3.1. Análisis de sensibilidad de los resultados a la variación de la altura. ....	58
Figura 5.3.2. Análisis de sensibilidad de los resultados a la variación de la velocidad del viento. ....	59
Figura 5.3.3. Variación del $F_{aT}$ con respecto al $P_{ip}$ para diferentes valores del coeficiente de variación (a) Coeficiente de variación de $\zeta_r$ , (b) Coeficiente de variación de $F_n$ y (c) Coeficiente de variación de $\xi$ . ....	61
Figura 5.3.3.1. Comparación de los factores de aceleración del edificio ejemplo y los valores de la curva H-50 para $f_n = 1.0$ Hz ....	64

---

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1 Planteamiento del Problema

A lo largo del último siglo y sobretodo en las décadas más recientes ha habido un incremento en la cantidad de edificios construidos en México debido a la creación de técnicas de análisis y mejoras en los materiales para la construcción, así como al constante crecimiento urbano que sufren ciudades como la Ciudad de México, sin embargo esto ha sido uno de los causales de que los sismos registrados en los últimos tiempos (p.e. el de 1985 o el de 2017) sean considerados como catastróficos tanto por las pérdidas humanas como materiales, las dos mayores razones para ello es la cada vez mayor altura y complejidad arquitectónica de estos edificios, así como lo poca desarrollada que estaba la ingeniería sísmica en México hasta la mitad del siglo pasado. A raíz de estos hechos se hizo cada vez más evidente la necesidad de avanzar en la adopción, creación y desarrollo de nuevas metodologías y normativas cada vez más rigurosas y eficientes en la concepción y construcción de estas estructuras; este proceso lleva varias décadas gestándose y ha dado como resultado que en la Ciudad de México se tenga una normativa sísmica de las más vanguardistas del mundo. Sin embargo, lo anterior no ha sido igual para todos los ámbitos de análisis de estructuras, entre ellos las afectaciones provocadas por el viento, esto es así porque, a diferencia de lo que sucede con los sismos, es poco frecuente que alguna estructura, particularmente edificios, sufra colapsos, provoque daños materiales graves o pérdidas humanas. Pero en los últimos tiempos se ha tomado conciencia de la importancia que tiene a nivel de confort el considerar la respuesta que pueden tener las estructuras ante ciertos niveles de viento, sobretodo en estructuras consideradas esbeltas como lo son los edificios altos o también las que tengan cierto grado de complejidad en su diseño arquitectónico. Y es que, los niveles de aceleración que se pueden dar en estructuras de gran altura pueden provocar diversos niveles de respuesta en sus ocupantes, desde la nula percepción de ésta pasando por las personas que sientan un ligero movimiento que les cause un poco de incomodidad hasta mareos o afecciones más graves.

Actualmente en la Ciudad de México existen las NTC-2017 en las que se incluye el apartado de normatividad para viento, en donde, expresa en su apartado 5.6 *Limitación de efectos dinámicos* que la aceleración en edificios altos, debida a empujes dinámicos no debe sobrepasar de 0.2 g, sin embargo, no especifica un procedimiento para comprobarla; esto para ambos sentidos, longitudinal y transversal, por lo que el realizar esta comprobación se vuelve ambiguo para la ingeniería práctica y se puede prestar a malas prácticas en la revisión de esta condición.

## **1.2 Objetivo y metodología**

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el efecto del desprendimiento de vórtices o fuerzas transversales en edificios altos, adoptando para ello la metodología de un código internacional y adaptarlo a las condiciones imperantes en la Ciudad de México.

El procedimiento para lograr el objetivo principal de este trabajo consiste en satisfacer los siguientes objetivos:

- Investigación y recopilación de la metodología de cálculo de los efectos del viento en el sentido transversal al flujo del viento de al menos tres códigos internacionales, de distintos continentes, que permitan el cálculo de la aceleración en el sentido transversal.
- Analizar y comparar las metodologías recopiladas por medio de un ejemplo de un edificio alto, implementando su procedimiento en el programa MATLAB, para seleccionar la más adecuada para el propósito del presente trabajo.
- Análisis de las ecuaciones presentes en la metodología seleccionada, aplicando un método numérico que permita calcular los factores de aceleración en este sentido y, con ello, graficar estos valores, calcular la línea de tendencia para cada variación en los coeficientes y nivel de percepción para, posteriormente, encontrar una ecuación que permita calcular los factores de aceleración para factorizar la aceleración inducida por el viento en el sentido transversal.
- Calibrar la función encontrada verificando la sensibilidad de la misma ante el cambio de distintas variables de interés, propias del edificio o de las condiciones imperantes del lugar.
- Desarrollo de un ejemplo de aplicación de un edificio alto en el que se aplique la metodología para el cálculo de los factores de aceleración encontrada anteriormente, comparando la aceleración factorizada obtenida de este con respecto a una aceleración límite permisible por una aceleración pico dada en el AIJ 2004.

## **1.3 Justificación**

Como se ha mencionado en el planteamiento del problema, la revisión de la aceleración causada por el viento en edificios altos se ha dejado un poco de lado en la normatividad vigente y con la creciente cantidad de este tipo de edificios construidos en los últimos tiempos, se hace de mayor importancia el tener metodologías que cumplan cabalmente con estas revisiones con el fin de proveer la comodidad máxima posible de los ocupantes de estos.

Es por ello que con este trabajo se pretende contribuir a este problema adaptando una metodología que se considere adecuada para la revisión de la aceleración causada por el viento en el sentido transversal, que a lo largo del mundo es poco considerada pero que en diversos casos resulta

---

tener una gran relevancia en la comodidad de sus ocupantes y que, a su vez, sirva como propuesta normativa nacional para una futura actualización de esta.

De la misma forma, se pretende que este trabajo contribuya a despertar el interés por la realización de este tipo de investigaciones, así como la implementación de lo descrito en este escrito en la práctica de la ingeniería estructural.

## **1.4 Objetivos**

### **General**

El objetivo general de este trabajo es proponer una metodología que considere los efectos del desprendimiento de vórtices o fuerzas transversales en edificios altos, que actualmente no se considera en la normativa nacional, utilizando para ello las metodologías propuestas en diversos códigos internacionales y por ello que sea considerado como una propuesta normativa para una futura actualización de las normas de viento de la Ciudad de México.

### **Específicos**

- Recopilación de los procedimientos propuestos en tres metodologías de códigos internacionales para el cálculo de la aceleración en el sentido transversal del viento en edificios altos.

- Realizar la comparativa de los resultados otorgados por esta metodología con base en un ejemplo de edificio alto propuesto, que permita un análisis más objetivo para la selección de la metodología más adecuada.

- Con la metodología elegida, verificar la insensibilidad de este procedimiento con las diferentes variables involucradas y de interés para el diseño, que sean propias del edificio o del lugar donde se ubique.

-Definir una ecuación para la obtención de los factores de aceleración para distintos niveles de percepción de la aceleración.

-Realizar un ejemplo de aplicación práctico de un edificio alto, obteniendo los factores de aceleración con la ecuación propuesta, para diferentes niveles de percepción de la aceleración, a su vez, obtener la aceleración causada en el edificio con la metodología encontrada y factorizándola con los valores de los factores de aceleración y, finalmente, realizar la comparación de esta aceleración con una límite permisible.

## **1.5 Alcance y limitaciones**

En el presente trabajo se presenta la investigación realizada acerca de la adaptación de una metodología para el cálculo del desprendimiento de vórtices o de la aceleración transversal, esto incluye, a grandes rasgos, lo siguiente: la presentación de las metodologías analizadas, así como del análisis realizado y a dar las motivaciones que llevan a su descarte o aprobación en la búsqueda de

---

un procedimiento que sería adaptado a las condiciones de la Ciudad de México, la obtención de los factores de aceleración a partir de la metodología escogida, el análisis de sensibilidad de los resultados a las diferentes variables de interés y, finalmente, la presentación de un ejemplo de aplicación con un edificio alto para la verificación de los niveles de percepción de la aceleración y definir si se requiere tomar medidas conforme a los valores encontrados de aceleración factorizada durante dicha verificación.

## 1.6 Antecedentes

Como ya se ha mencionado anteriormente el desarrollo de la ingeniería de viento a nivel nacional no había tenido un desarrollo comparable con la ingeniería sísmica, por ejemplo, al menos hasta hace algún tiempo; sin embargo, con el desarrollo de investigaciones como las llevadas a cabo por personas como el profesor Davenport, han dado pie a que más ingenieros en el mundo se interesen por crear, desarrollar o adoptar metodologías que permitan en la práctica la evaluación de las diferentes afectaciones causadas por el viento en las estructuras.

En el caso de México para el tema del presente escrito, que es la revisión de la aceleración provocada por el viento en edificios altos, como ya se había mencionado anteriormente, se tienen en las normas técnicas complementarias de la Ciudad de México para diseño por viento, en el apartado *5.6 Limitación de efectos dinámicos* que la aceleración en edificios altos, debida a empujes dinámicos no debe sobrepasar de 0.2 g, sin embargo, no se especifica el procedimiento a realizar para su revisión.

### 1.6.1 Manual De Obras Civiles (MDOC-2020)

También existe el Manual de Obras Civiles (MDOC-2020), que en su apéndice *4B INESTABILIDAD AEROELÁSTICA Y CONDICIONES DE SERVICIO* y el subapéndice *4B.2.2.2 Aceleración máxima en la dirección longitudinal* propone un método para la revisión de la aceleración máxima de una estructura prismática en la dirección longitudinal del viento con base en dos métodos, uno analítico u otro gráfico.

En el caso del método analítico se tiene la ecuación B.11:

$$\ddot{X}_{max} = k_p \sigma_{\ddot{x}}$$

Donde:

$K_p$  es el factor pico, adimensional, calculado con la expresión B.12 del mismo manual.

$\sigma_{\ddot{x}}$  es la desviación estándar de la aceleración de la estructura en  $m/s^2$  y se calcula con la ecuación B.13 del manual.

El valor resultante se compara con los valores correspondientes de la Tabla B.4 del MDOC-2020.

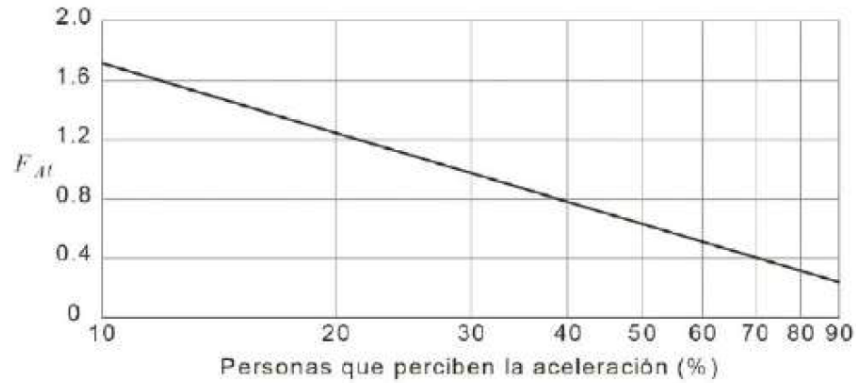
El segundo procedimiento requiere de la resolución de la ecuación B.14 que es la siguiente:

$$(\ddot{X}_{max} \cdot F_{At}) \leq a_c$$

Donde:

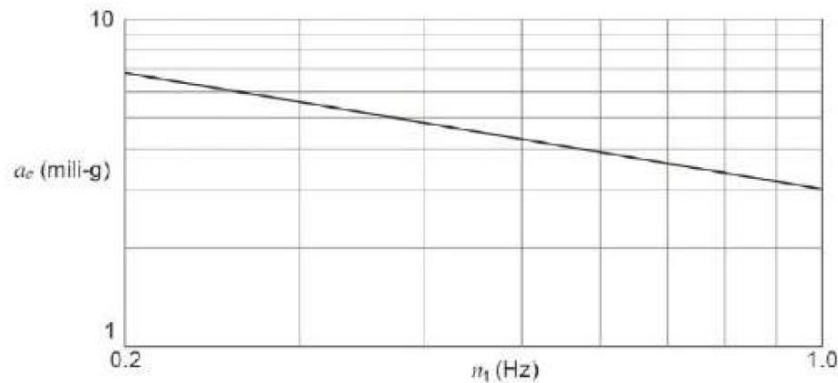
El valor de  $\ddot{X}_{max}$  se obtiene de la ecuación B.11.

El valor de  $F_{At}$  se obtiene de la Figura B.4 del MDOC-2020 (Figura 1.6.1):



**Figura 1.6.1** Figura B.4 del MDOC-2020 factor de aceleración ( $F_{At}$ ) en función del porcentaje de personas que perciben la aceleración.

Finalmente, el valor de  $a_c$  se obtiene de la Figura B.5 del MDOC-2020 (Figura 1.6.2).



**Figura 1.6.2** Figura B.5 del MDOC-2020: Aceleración crítica ( $a_c$ ) en función de la frecuencia natural de vibrar ( $n_1$ )

Sin embargo, como ya se mencionó, el procedimiento del MDOC-2020 esto es solo para la revisión de la aceleración longitudinal, no existiendo ningún método para la revisión de la aceleración transversal.



## CAPÍTULO 2

### PERCEPCIÓN HUMANA DE LA ACELERACIÓN

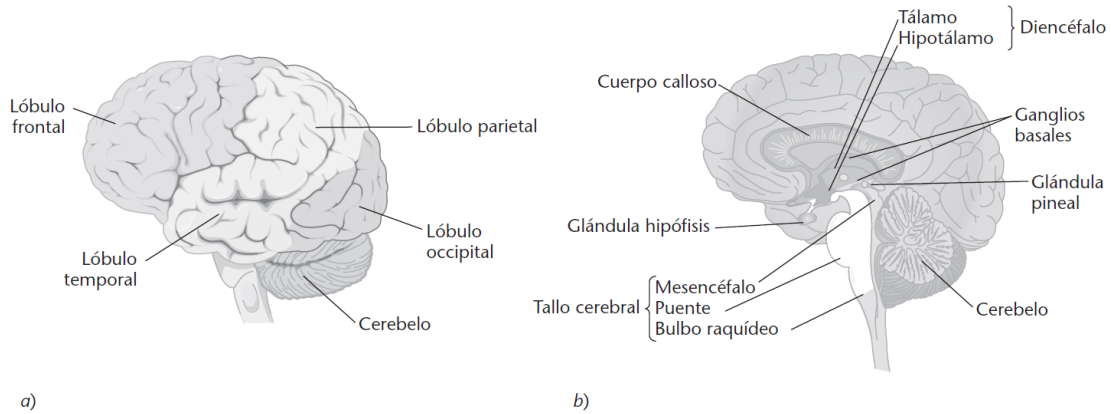
A lo largo de este capítulo se analizará cómo se percibe y afecta la aceleración al ser humano, un tema de suma importancia en lo que se refiere al diseño de edificaciones, sobre todo las de gran altura.

Como menciona C.S. Kwok, Kenny et al (2015) en el libro “Wind-Induced Motion of Tall Buildings”, los efectos de la aceleración no son un caso nuevo de estudio, es un tema conocido desde que los primeros jinetes de carros sufrían sus efectos en el año 60 d.C., hoy en día es más preocupante por la gran cantidad de personas que pueden sentir sus efectos en los edificios de gran altura, provocados por los fenómenos del viento; esta exposición al movimiento puede causar miedo y alarma e interferir con las actividades diarias de los ocupantes del edificio. Si se tiene una exposición prolongada puede causar incomodidad, afectar al bienestar y al rendimiento de las tareas, y en casos extremos, puede provocar síntomas de *cinetosis* del movimiento, como dolor de cabeza, mareos y náuseas.

La unidad central de control de todos los subsistemas, como el estructural, hidráulico, eléctrico, químico y termodinámico, del cuerpo humano es el cerebro, el cual se complementa con los sistemas ópticos y acústicos. También es sabido que la respuesta biodinámica del cuerpo humano varía de forma aleatoria de una persona a otra. La forma en que los seres humanos perciben y responden a los cambios en su entorno físico es una de las áreas más difíciles desde el punto de vista técnico y más sofisticadas desde el punto de vista conceptual de la psicología moderna. En parte, esto es debido, a que la psicología ya no considera a la percepción humana un proceso primitivo, a pesar de que parece funcionar de manera similar a organismos menos avanzados en donde solo se tiene una recepción pasiva del ambiente, sino que la considera como un agente que responde e intercambia información recibida del entorno.

La interacción del ser humano con su entorno se da a través de los sentidos, que no se limitan a 5, como expresaba la tradición aristotélica (exteroceptores), sino que el ser humano puede responder a otras fuentes como la temperatura (termocepción), el sentido cinestésico (propiocepción), el dolor (nociocepción), el equilibrio (equilibriocepción) y la aceleración.

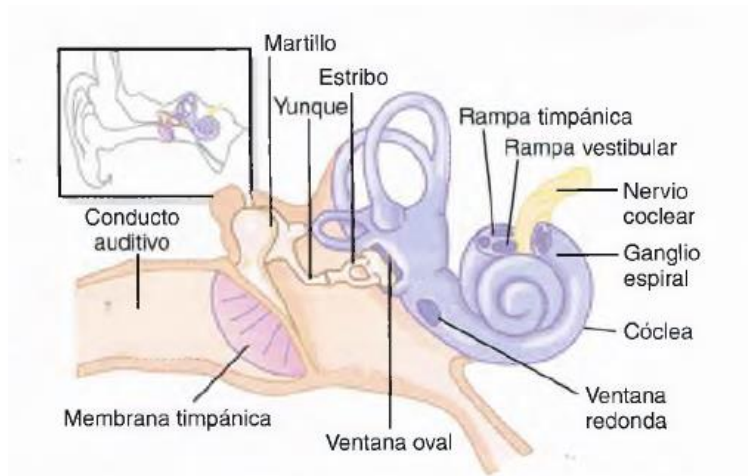
---



**Figura 2.1.** Partes del cerebro, vista lateral. El cerebro consiste en tres partes principales: el tallo cerebral, el cerebelo y, arriba de ambos, el encéfalo de gran tamaño. El tallo cerebral controla funciones corporales básicas, tales como respiración, sueño, circulación y reflejos. El cerebelo, al momento del nacimiento, empieza a controlar el equilibrio, más adelante, coordina la actividad sensorial y motora. El encéfalo constituye casi 70% del peso del sistema nervioso y maneja el pensamiento, memoria, lenguaje y emoción, así como la entrada de estímulos sensoriales y el control motor consciente. a) Vista exterior del lado izquierdo del cerebro: el encéfalo se divide en dos mitades, o hemisferios, cada uno de los cuales tiene cuatro secciones o lóbulos: el lóbulo occipital, que procesa la información visual; el lóbulo temporal, que ayuda con la audición y el lenguaje; el lóbulo parietal, que recibe las sensaciones táctiles y la información espacial y que facilita la coordinación ojo-mano; y el lóbulo frontal, que permite el discurso y el razonamiento. La corteza cerebral, la capa exterior del encéfalo, es la sede de los procesos de pensamiento y de la actividad mental. b) Vista interior del hemisferio derecho: varias estructuras importantes que se encuentran a nivel profundo en el interior del encéfalo —el tálamo, el hipocampo (no se muestra) y los ganglios basales, todos los cuales controlan movimientos y funciones básicas (adaptada de E. Papalia, Diane (2009). "Psicología del desarrollo").

## 2.1 Mecanismos de percepción del movimiento

El sentido que más se atañe a la percepción de la aceleración en edificios altos y sus consecuencias, es la *propiocepción*, este sentido se refiere a la capacidad del ser humano para saber en dónde se encuentra en el espacio y donde están sus extremidades en relación con las demás. Esta capacidad se debe a que el hecho de que en los músculos y tendones hay receptores llamados propioceptores. En las articulaciones hay una clase especial de receptores llamados *cinestésicos*. Estos receptores proporcionan información sobre la ubicación de nuestras extremidades en relación con el movimiento. Estos sistemas están integrados en el sistema vestibular, que a su vez está vinculado al cerebelo y a las vías visuales. El sistema vestibular está situado en el oído interno de los humanos y tiene tres funciones principales: (1) ayudar a regular la postura y el tono muscular, (2) controlar los movimientos oculares compensatorios y (3) proporcionar información al sistema nervioso autónomo (Stranding, 2008). La Figura 2.2 muestra un esquema de la estructura del oído.

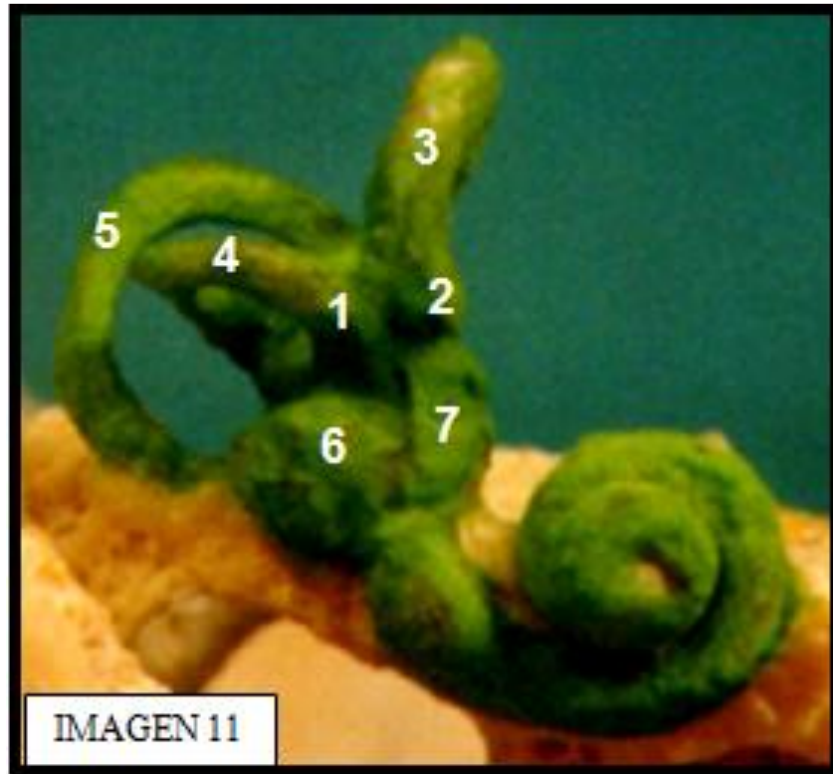


**Figura 2.2** Estructura del oído, en donde se puede observar el oído externo, medio e interno, además del sistema vestibular (adaptada de Guyton, Hall. “Tratado de Fisiología Médica”).

El sistema vestibular permite distinguir entre los movimientos de la cabeza realizados activa y pasivamente, también detecta la inercia, coordinación del movimiento y el movimiento real. Las dos partes relevantes para el mareo son los canales semicirculares y los órganos otolíticos.

Los canales semicirculares son tres protuberancias casi circulares, situadas más o menos ortogonales entre sí, que detectan la aceleración angular de cualquier cabeceo, guiñada o balanceo de la cabeza. En posición de pie, la gravedad ejerce una fuerza constante sobre el fluido endolinfático contenido en el movimiento de la cabeza hace que el fluido se mueva a través de los canales, que es detectado por unos diminutos pelos, llamados cilios, que transmiten la señal al cerebro (Strandring, 2008).

Los otolitos están formados por el sáculo y el utrículo, que detectan la aceleración lineal y la fuerza de la gravedad. El sáculo está orientado verticalmente, para percibir el movimiento como en un ascensor, mientras que el utrículo está orientado horizontalmente, para permitir la percepción de la aceleración, como la de un vehículo que se desplaza en línea recta. La figura 2.3 muestra el sistema vestibular.



**Figura 2.3** Sistema vestibular, en donde se pueden apreciar 1) Ampolla conducto semicircular posterior, 2) Conducto semicircular posterior. 3) Cruz comunis. 4) Conducto semicircular externo. 5) Conducto semicircular posterior. 6) Sáculo. 7) Utrículo. (Adaptada de Arruñada, Fernando. Anatomía del aparato vestibular, 2015)

El umbral sensorial o limen, es un concepto teórico utilizado en psicofísica, la rama de la psicología que investiga la relación entre la percepción de los estímulos y la calidad y cantidad medibles de los mismos. Pero, a pesar que a lo largo de su historia la psicofísica ha realizado estudios en multitud de sujetos individuales, existen amplias áreas en las que el trabajo experimental sobre la naturaleza básica de la capacidad humana está todavía poco desarrollado debido a la amplia variación individual en la experiencia de los diferentes estímulos y numerosas influencias en su presentación y experiencia.

Entre estas áreas se encuentra la percepción del “movimiento”, ya que la percepción del movimiento del cuerpo está mucho mejor estudiada. Los sistemas básicos necesarios para percibir el movimiento están integrados en otros órganos, especialmente los ojos. Los experimentos en salas inclinadas demostraron, por primera vez, el predominio de la información visual en la evaluación precisa de la rotación angular de los ojos cerrados. Se comprobó que los sujetos eran más precisos sin tener una referencia visual que distorsionara su percepción (Witkin, 1959).

Los experimentos del movimiento han sido realizados por numerosos investigadores como Khan y Parmelee (1971), Chen y Robertson (1972), Goto (1975), Irwin (1981), Kanda et al. (1988), Goto et al. (1990), Shioya et al. (1992), Shioya y Kanda (1993), Noguchi et al. (1993), Denoon et al (2000a), Burton et al. (2003, 2004a, b, 2005, 2006a), Michaels et al. (2009, 2013), entre otros, bajo condiciones experimentales cuidadosamente controladas para superar las incertidumbres planteadas de los experimentos de campo y las encuestas a los ocupantes de los edificios. Estos experimentos de simulación de movimiento se realizaron de forma unidireccional, bi-direccional y en sentido torsional, esto para varias frecuencias, amplitudes y duraciones y con sujetos humanos en diferentes posturas u ocupados en distintas actividades para evaluar su percepción del movimiento.



**Figura 2.4.** Un simulador de movimiento de doble eje, se muestra la sala de pruebas de 3 m por 3 m y el contenido de la sala de pruebas. Esta sala es capaz de simular vibraciones sinusoidales y vibraciones aleatorias de dos grados de libertad en edificios altos con frecuencias dominantes entre 0.1 y 1.2 Hz (adaptadas de C. S. Kwok, Kenny et al (2019). “Wind-Induced Motion of Tall Buildings”).

A pesar de la posibilidad de obtener resultados sesgados debido al preconditionamiento, en el cual los sujetos de prueba esperan la experiencia de vibración, y la utilización de un entorno simulado en lugar de uno real, los simuladores de movimiento siguen siendo la mejor opción para estudiar la respuesta humana a las vibraciones inducidas por el viento en los edificios altos.

Golding (1998, 2006) realizó cuestionarios sencillos para individuos sobre sus síntomas cuando fueron sometidos a dosis altas de movimiento y de larga duración; este cuestionario fue llamado MSSQ (Motion Sickness Sensitivity Questionnaire). Sin embargo, las respuestas menos claras surgen de las preguntas que examinan la exposición al movimiento. Los parámetros físicos del

estímulo son productos de la amplitud y una potencia de la frecuencia. Por tanto, los parámetros del estímulo deben controlarse para mejorar el confort humano en los edificios altos.

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LA ACELERACIÓN TRANSVERSAL

### 3.1 CÓDIGO ITALIANO CNR-DT 207/2008/ Instrucciones para la evaluación de las acciones del viento y los efectos en del viento en los edificios

#### 3.1.1 Origen del documento CNR-DT 207/2008

Como se expresa en el mismo documento CNR-DT 207/2008, a lo largo de las últimas décadas se han dado la aparición de técnicas y materiales innovadores, la evolución de los métodos numéricos y experimentales, y también del deseo de la realización de estructuras de cada vez más belleza y elegancia, han dado como resultado obras caracterizadas por una audacia y una complejidad crecientes. Normalmente estas estructuras se caracterizan por su altura, longitud, esbeltez, flexibilidad y ligereza, combinadas con formas y dimensiones inusuales. Como tales, están expuestos a la acción aerodinámica del viento, por lo que este se convierte en la principal acción cuyos efectos deben evaluarse para lograr una seguridad adecuada.

Con el paso de los años estas estructuras complejas han dado pie al desarrollo de diversas soluciones que son promovidas por diversos países a través de organizaciones como la *International Association for Wind Engineering* (IAWE). Italia por su parte ha tomado numerosas iniciativas a través de la *Associazione Nazionale per l'Ingegneria del Vento* (ANIV), que ha permitido el crecimiento sustancial a nivel científico y técnico de la disciplina a la difusión de los conocimientos sobre las acciones y los efectos del viento a través de un número creciente de cursos de grado, postgrado y especialización, a la creación de laboratorios de última generación, etc.

Ante este panorama la normativa del mundo ha sido increíblemente contradictoria, ya que algunos países como Estados Unidos, Japón, Australia, Canadá y el Reino Unido han actualizado regularmente sus normas, trasladando la evolución de las cargas de viento a la ingeniería estructural. Italia, por su parte, creó en 1964 el Consejo Nacional de Investigación, en donde se emitieron las primeras normas del mundo sobre la acción del viento en los edificios, sin embargo, ha permanecido atada a este esquema inicialmente pionero superado después por la evolución de los conocimientos, ahora notoriamente deficientes o falaces en muchos de sus aspectos.

Debido a este tipo de atrasos, a partir de los años 90's los Eurocódigos buscaron estar a la vanguardia con la escena internacional, pero situó a los ingenieros italianos ante un documento amplio, articulado y complejo, muy diferente de las prescripciones normativas aplicadas durante

---

años. Por lo tanto, el ingeniero italiano, que no fue hecho participe de este proceso mediante una evolución normativa sistemática y progresiva, permaneció en gran medida ajeno a él. En estos últimos años la promulgación de la nueva legislación italiana, que unifica el panorama de la normativa sobre construcción, acerca el marco normativo italiano al europeo.

Sin embargo, esto no fue suficiente para salvar la brecha entre los dos documentos que siguen siendo muy diferentes en términos de complejidad y articulación con otros documentos de igual o mayor complejidad, lo que obligaba al ingeniero a recopilar varios de ellos.

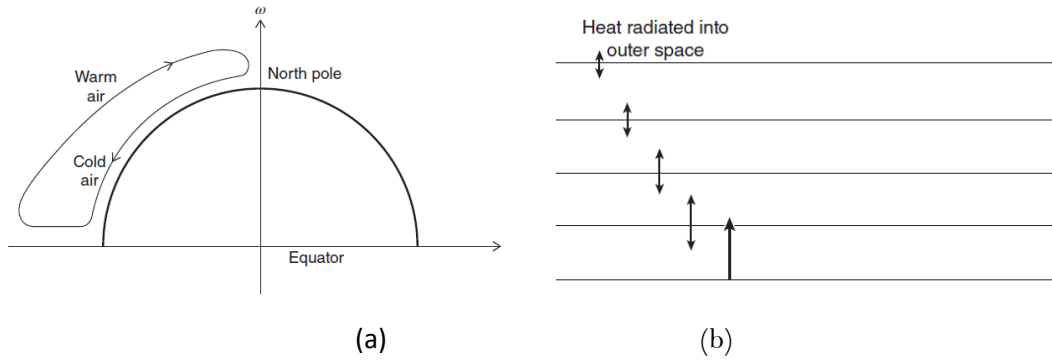
Ante esta situación el Consejo Nacional de Investigación dio un paso adelante creando el documento CNR-DT 207/2008. Que puede considerarse, desde el punto de vista normativo como un “instructivo”; también, desde este punto de vista, es coherente con las Normas Técnicas de la Construcción (Decreto Ministeriale 14/01/2008) y, en general, con los Eurocódigos. Este documento es aplicable a las construcciones civiles, siempre que no superen los 200 m de altura, a las construcciones industriales, incluidos los equipos de manutención y elevación, y a los puentes, siempre que tengan vanos no superiores a 200 m y sean de los tipos especificados.

### **3.1.2 Base teórica de la respuesta transversal**

De acuerdo a Simiu, Emil & Yeo, DongHun (2019) en su libro “Wind Effects on Structures: Modern Structural Design for Wind”, los fenómenos meteorológicos que ocurren en la atmósfera terrestre son producidos por la radiación proveniente del Sol; el calor irradiado por dicha radiación sobre la superficie de la tierra da lugar a regímenes térmicos y campos de presión responsables de los movimientos de las masas de aire, que se clasifican generalmente según su escala espacial y temporal. El análisis de las acciones del viento y sus efectos en los edificios se basa en la evaluación de velocidad del viento,  $V$ , en el lugar de la construcción. Suponiendo que la construcción es inicialmente fija e indeformable, el viento  $V$  ejerce un sistema de acción aerodinámica (que es una función de la forma, la orientación y las dimensiones de la estructura), sobre la construcción en su conjunto, y sobre sus componentes individuales.

---



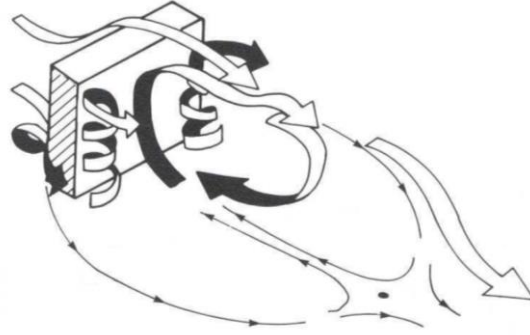


**Figura 3.1** (a) Modelo simplificado de la circulación atmosférica, (b) El transporte de calor a través de la radiación en la atmósfera (adaptadas de Simiu, Emil & Yeo, DongHun (2019). “Wind Effects on Structures: Modern Structural Design for Wind”).

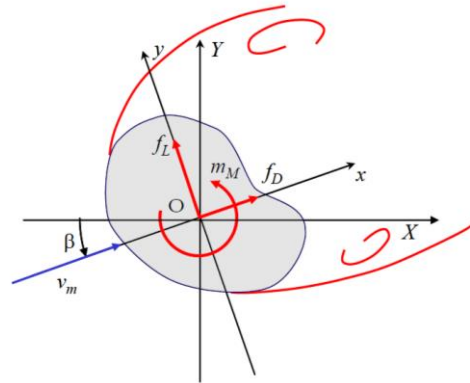
De acuerdo al documento CNR-DT 207/2008, suponiendo que la estructura está sometida a desplazamientos causados por el viento, pero que estos desplazamientos son tan pequeños que el estado del sistema puede identificarse con la configuración inicial, la respuesta puede determinarse con los métodos clásicos de análisis estructural. Esta es de tipo estático para estructuras rígidas y amortiguadas; es de tipo dinámico para estructuras flexibles y/o poco amortiguadas.

En la realidad, especialmente en el caso de estructuras ligeras, flexibles y/o poco amortiguadas, caracterizadas por una forma aerodinámica susceptible a las acciones del viento, los desplazamientos y las velocidades del movimiento de la estructura son a veces tan grandes que provocan fenómenos de interacción viento-estructura, llamados fenómenos aeroelásticos o de retroalimentación, que modifican el viento incidente, las acciones aerodinámicas y la respuesta. En resumidas cuentas, el viento es la causa que produce la respuesta de la construcción y sus elementos. La relación entre la causa y la respuesta depende de la aerodinámica, la dinámica y la aeroelasticidad.

Ahora bien, consideremos un cuerpo fijo e indeformable inmerso en el viento. Se pueden identificar dos efectos relacionados: por un lado, el cuerpo modifica el flujo alterando su configuración local; por otro lado, surge una presión en la superficie del cuerpo que es diferente de la presión estática  $P_0$  del flujo no perturbado. La superficie del cuerpo está pues sometida a una acción aerodinámica ligada, en su conjunto, a la variación de la presión sobre su superficie. La representación del fenómeno físico cambia en función de si el fluido tiene propiedades típicamente tridimensionales (Figura 3.2) o si se puede remontar, al menos lejos de las zonas de borde, a un régimen bidimensional (Figura 3.3).



**Figura 3.2** Cuerpo tridimensional en un campo de viento (adaptada de Consiglio Nazionale delle Ricerche (2009). "Istruzioni per la valuatazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni").



**Figura 3.3** Cuerpo bidimensional en un campo de viento (adaptada de Consiglio Nazionale delle Ricerche (2009). "Istruzioni per la valuatazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni").

Suponiendo que los desplazamientos causados por el viento son pequeños, pueden estimarse aplicando al cuerpo las acciones aerodinámicas evaluadas tratando el cuerpo como fijo e indeformable. Estas acciones se esquematizan (por unidad de longitud) mediante una fuerza longitudinal  $F_D$  ( $D$  = arrastre, en la dirección  $x$ ), una fuerza transversal  $F_L$  ( $L$  = sustentación, en la dirección  $y$ ) y un par de torsión ( $M$ , alrededor del eje  $z$ ) (Figura 3.3). Como resultado de estas acciones, el cuerpo manifiesta tres formas de respuesta, definidas como longitudinal ( $D$ ), transversal ( $L$ ) y torsional ( $M$ ). La respuesta longitudinal y la respuesta transversal se expresan, respectivamente, en los planos  $x, z$  e  $y, z$ ; la rotación torsional se produce alrededor del eje  $z$ . Se supone que, para simplificar, las tres respuestas están desacopladas e incluyen la aceleración la velocidad y el desplazamiento, como se muestra a continuación suponiendo que la estructura posee un comportamiento elástico lineal, la ecuación de movimiento del grado de libertad longitudinal  $x(t)$  toma la forma.

$$\ddot{x}(t) + 2 \cdot \xi_D \cdot (2\pi \cdot n_D) \cdot \dot{x}(t) + (2\pi \cdot n_D)^2 \cdot x(t) = \frac{1}{m} \cdot f_D(t)$$

Donde  $m$ ,  $n_D$  y  $\xi_D$  son la masa, la frecuencia fundamental y la respuesta del amortiguamiento.

### 3.1.3 Revisión de la aceleración transversal

De acuerdo a lo dictado por el apéndice M del documento CNR-DT 207/2008, se tiene el siguiente procedimiento para realizar la revisión de la aceleración transversal:

#### Datos

Para la revisión de esta aceleración este instructivo requiere de los siguientes datos iniciales:

H, altura del edificio en metros.

B, base del edificio en metros.

D, ancho del edificio en metros.

T, intervalo de tiempo en el que se evalúa la velocidad media del viento, en segundos.

$\rho$ , densidad aparente media del aire = 1.23 kg/m<sup>3</sup>.

V<sub>b</sub>, velocidad base de referencia asociada a un T<sub>r</sub> = 50 años, en m/s.

T<sub>r</sub>, periodo de retorno estudiado, en años.

n<sub>LT</sub>, frecuencia del primer modo transversal (en la dirección ortogonal a la velocidad del viento) o del primer modo de torsión, según la verificación que se realice, en Hertz.

$\xi_L$ , relación de amortiguación del primer modo transversal.

M, masa total del edificio, en kg

#### Coefficiente de topografía

De acuerdo al apartado 3.2.4 del instructivo CNR-DT 207/2008, el coeficiente de topografía se establece a partir de los siguientes puntos:

(1) El coeficiente topográfico C<sub>t</sub>, generalmente en función de la altura z sobre el suelo, tendrá en cuenta las características topográficas y orográficas del lugar de la construcción.

(2) A falta de evaluaciones más detalladas (Apéndice C del CNR-DT 207/2008), el coeficiente de topografía se establece normalmente igual a 1 para las zonas llanas, así como para las onduladas, accidentadas y montañosas.

(3) En el caso de edificios situados en la cima de colinas o laderas aisladas, el coeficiente topográfico C<sub>t</sub> debe derivarse de datos respaldados por la documentación adecuada. En el Apéndice D del CNR-DT 207/2008 figuran los criterios de cálculo.

(4) En el caso de construcciones situadas en valles que favorecen la canalización del viento, se recomienda realizar evaluaciones detalladas.

#### Forma modal del primer modo de vibración en la dirección transversal:

De acuerdo al apartado I.3.1 del CNR-DT 207/2008, la forma del primer modo de oscilación a flexión  $\phi_{1(z)}$  para edificios, torres y chimeneas puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

$$\phi_{1(z)} = \left(\frac{z}{H}\right)^\zeta$$

Ec. 3.1.3.1

Donde:

Z, es la altura respecto a la base

H, es la altura total del edificio

$\zeta$ , es un parámetro que define la forma del modo de oscilación. Se sugieren los siguientes valores:

$\zeta=0.6$  para estructuras de marcos esbeltos sin muros de corte;

$\zeta=1.0$  para los edificios con armazón con núcleo central o arriostramientos;

$\zeta=1.5$  para edificios esbeltos con comportamiento de ménsula y edificios con núcleo central de concreto reforzado.;

$\zeta=2.0$  para torres y chimeneas;

$\zeta=2.5$  para las torres de celosía de acero.

Para el cálculo se deben calcular dos formas modales:

- La primera a la altura total del edificio, H.
- La segunda a una altura Z, que será a nivel de piso del último nivel del edificio.

#### **Masa generalizada del edificio en kg, relativa al primer modo transversal:**

De acuerdo al apartado I.4 del CNR-DT 207/2008, la masa generalizada,  $m_i$ , relativa al i-ésimo modo de vibración  $\phi_1(s)$ , es proporcionada por la expresión:

$$m_i = \int_0^l m(s) \cdot \phi_1^2(s) ds \quad \text{Ec. 3.1.3.2}$$

Donde:

$m(s)$ , es la masa de la estructura por unidad de longitud, en general una función de la abscisa  $s$ ;

$l$ , es la altura de la estructura (o la longitud del elemento estructural).

#### **Velocidad de referencia de diseño**

Para el cálculo de la velocidad de referencia de diseño, se tiene, de acuerdo al apartado 3.2.2 del CNR-DT 207/2008, que esta será proporcionada por la siguiente ecuación:

$$V_r = V_b \cdot C_r \quad \text{Ec. 3.1.3.3}$$

Donde:

$V_b$  es la velocidad de referencia del viento asociada a un periodo de retorno  $T_r = 50$  años de acuerdo al apartado 3.2.1

$C_r$ , es el coeficiente de retorno proporcionado por las siguientes expresiones:

$$C_r = 0.75 \quad \text{Para } T_r = 1 \text{ año} \quad \text{Ec. 3.1.3.4}$$

$$C_r = 0.75 + 0.0652 \ln(T_r) \quad \text{Para } 1 \text{ año} \leq T_r < 5 \text{ años} \quad \text{Ec. 3.1.3.5}$$

$$C_r = 0.75 \sqrt{1 - 0.2 \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T_r} \right) \right]} \quad \text{Para } 5 \text{ años} \leq T_r < 50 \text{ años} \quad \text{Ec. 3.1.3.6}$$

$$C_r = 0.65 \left\{ 1 - 0.138 \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T_r} \right) \right] \right\} \quad \text{Para un } T_r \geq 50 \text{ años} \quad \text{Ec. 3.1.3.7}$$

Donde  $T_r$  es el periodo de retorno del proyecto expresado en años.

### Categoría del terreno

De acuerdo al apartado 3.2.3 *Categoría de exposición* del CNR-DT 207/2008, la categoría del terreno está definida de acuerdo a la ubicación del edificio en estudio con respecto al terreno costero y al medio que lo rodea, el cual está dado de acuerdo a la siguiente tabla:

**Tabla 3.1** – Clase de rugosidad del terreno

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
A	Zona urbana, donde al menos el 15% de la superficie del suelo está cubierta por edificios con una altura media de más de 15 m.
B	Zona urbana (no clase A), suburbana, industrial o arbolada.
C	Zona con obstáculos difusos (como árboles, casas, muros, vallas, .....); a) Mar y su franja costera (a menos de 2 km de la orilla). b) Lago (con una anchura de al menos 1 km) y su franja costera (a menos de 1 km de la orilla).
D	(c) Zona libre de obstáculos o con, a lo sumo, algunos obstáculos aislados (campo abierto, aeropuertos, zonas agrícolas, pastos, pantanos o zonas arenosas, superficies nevadas o congeladas, ...).

### Velocidad media, $V_m$ :

La velocidad media del viento,  $V_m$ , se calcula, de acuerdo al apartado 3.2.5 del CNR-DT 207/2008, con la ecuación 3.1.3.8 para una altura no mayor de 200 m, en cuyo caso el manual propondría realizar un análisis más exhaustivo del terreno (dirección del viento, rugosidad y topografía reales; esto de acuerdo al Apéndice C del manual) que rodea a la construcción:

$$V_m(Z) = V_r \cdot C_m(Z) \quad \text{Ec. 3.1.3.8}$$

donde:

$Z$ , es la altura sobre el suelo estudiada

$V_r$ , es la velocidad de referencia de diseño

$C_m$ , es el coeficiente del perfil medio del viento proporcionado por las siguientes ecuaciones:

$$C_m(Z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{Z_{min}}{Z_0}\right) \cdot C_t(Z_{min}) \quad \text{Para } Z \leq Z_{min}$$

$$C_m(z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \cdot C_t(Z) \quad \text{Para } Z > Z_{min}$$

donde:

$Z_{min}$ , longitud de la rugosidad

$Z_0$ , altura mínima

$K_r$ , parámetro de la Tabla 3.2

**Tabla 3.2** – Valores de los parámetros  $k_r$ ,  $Z_0$  y  $Z_{\min}$  para las diversas categorías de exposición

Categorie di esposizione del sito	$k_r$	$z_0$ (m)	$z_{\min}$ (m)
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

### Evaluación de los efectos de las acciones transversales:

Una vez calculada la velocidad media se realizan las siguientes revisiones de acuerdo al apéndice M.1 del CNR-DT 207/2008, la ecuación 3.1.3.9 sirve para determinar si es necesario realizar la revisión de los efectos de las aceleraciones transversales:

*Ecuación 3.1.3.9:*

$$\frac{H}{\sqrt{B \cdot D}} \geq 3$$

Si la ecuación anterior resulta favorable, se revisarán las condiciones siguientes:

- La dirección del viento es ortogonal a una cara del edificio (suele ser el caso de carga más desfavorable);
- El edificio tiene una distribución de masa vertical uniforme;
- Se deben cumplir las tres ecuaciones siguientes que determinan si es posible aplicar el procedimiento descrito posteriormente para calcular las acciones estáticas equivalentes y las aceleraciones transversales al viento y a la torsión:

*Ecuación 3.1.3.10:*

$$\frac{H}{\sqrt{B \cdot D}} \leq 6$$

*Ecuación 3.1.3.11:*

$$0.2 \leq \frac{D}{B} \leq 5$$

*Ecuación 3.1.3.12:*

$$\frac{V_{m(H)}}{n_{LT} \sqrt{B \cdot D}} \leq 10$$

Al cumplirse las condiciones anteriores entonces se puede continuar con el análisis:

### Coefficiente de fuerza aerodinámica

De acuerdo al apartado M.2 del CNR-DT 207/2008, para el método de la aceleración transversal el coeficiente de fuerza aerodinámica se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_T = 0.0082 \left(\frac{D}{B}\right)^3 - 0.071 \left(\frac{D}{B}\right)^2 + 0.22 \left(\frac{D}{B}\right) \quad \text{Ec. 3.1.3.10}$$

donde:

D, ancho del edificio en metros.

B, base del edificio en metros.

### Factor de respuesta resonante en la dirección transversal

De acuerdo al apéndice M.2 del CNR-DT 207/2008, se tienen las siguientes ecuaciones para encontrar el factor de respuesta resonante en la dirección transversal,  $R_T$ :

Parámetros  $n_s$ :

$$n_{s1} = \frac{0.12}{\left\{1 + 0.38 \left(\frac{D}{B}\right)^2\right\}^{0.89}} \frac{V_{m(H)}}{B} \quad \text{Ec. 3.1.3.11}$$

$$n_{s2} = \frac{0.56}{\left(\frac{D}{B}\right)^{0.85}} \frac{V_{m(H)}}{B} \quad \text{Ec. 3.1.3.12}$$

Parámetros  $\beta$ :

$$\beta_1 = \frac{\left(\frac{D}{B}\right)^4 + 2.3 \left(\frac{D}{B}\right)^2}{\left[2.4 \left(\frac{D}{B}\right)^4 - 9.2 \left(\frac{D}{B}\right)^3 + 18 \left(\frac{D}{B}\right)^2 + 9.5 \left(\frac{D}{B}\right) - 0.15\right]} + \frac{0.12}{\left(\frac{D}{B}\right)} \quad \text{Ec. 3.1.3.13}$$

$$\beta_2 = 0.28 \left(\frac{D}{B}\right)^{-0.34}$$

Parámetro m:

$$m = \begin{cases} 1 & \frac{D}{B} < 3 \\ 2 & \frac{D}{B} \geq 3 \end{cases}$$

Parámetros k:

$$K_1=0.85, K_2 = 0.02$$

Parámetro  $S_T$ , que se calcula con la ecuación:

$$S_T = \sum_{j=1}^m \frac{4k_j(1 + 0.6\beta_j)\beta_j}{\pi} \frac{\left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2\right]^2 + 4\beta_j^2 \left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2} \quad \text{Ec. 3.1.3.14}$$

Factor de respuesta resonante en la dirección transversal:

$$R_T^2 = \frac{\pi \cdot S_T}{4\xi_T} \quad \text{Ec. 3.1.3.15}$$

**El factor pico:**

Para el cálculo del factor pico, de acuerdo al apartado M.2 del CNR-DT 207/2008, se usa la siguiente ecuación:

$$g_T = \sqrt{2\ln(n_T \cdot T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln(n_T \cdot T)}} \geq 3 \quad \text{Ec. 3.1.3.16}$$

Donde:

$n_T$ , es la frecuencia del primer modo transversal del edificio

$T$ , es el intervalo de tiempo en el que se evalúa la velocidad media del viento,  $T = 600$  segundos.

**Desviación estándar de la aceleración transversal a la altura z:**

De acuerdo al apéndice M.5 del CNR-DT 207/2008, el valor de la desviación estándar de la aceleración transversal a la altura  $z$  se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{aT}(Z) = \frac{0.5 \cdot \rho \cdot V_m^2(H) \cdot B \cdot H}{m_T} C_T \cdot R_T \cdot \phi_T(H) \cdot \phi_T(Z) \quad \text{Ec. 3.1.3.17}$$

**Aceleración transversal máxima:**

Finalmente, la aceleración transversal máxima se calcula, de acuerdo al apéndice M.5 del CNR-DT 207/2008, con la siguiente ecuación:

$$a_{pT}(Z) = g_T \cdot \sigma_{aT}(Z) \quad \text{Ec. 3.1.3.18}$$



### 3.2 CÓDIGO CANADIENSE: NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA

De acuerdo al código canadiense (*National Building Code of Canada, 2015*), la forma de calcular la aceleración transversal consiste en los siguientes pasos (Capítulo IV):

#### Factor de exposición:

De acuerdo a este capítulo el factor de exposición se obtiene con alguna de las siguientes ecuaciones sujetas a las condiciones dictadas a continuación:

Exposición A (exposición abierta o estándar) para terreno abierto, donde el terreno abierto es terreno llano con solo edificios dispersos, árboles u otras obstrucciones, aguas abiertas o costas de las mismas. Esta es la exposición en la cual se basa la velocidad de viento de referencia.

$$C_e = \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.28} ; C_e \geq 1.0 \quad \text{Ec. 3.2.1}$$

Donde:

Z, es la altura de interés en metros.

C<sub>e</sub>, es el factor de exposición

Exposición B. Áreas urbanas o suburbanas, terrenos boscosos o centros de grandes ciudades.

$$C_e = 0.50 \left(\frac{Z}{12.7}\right)^{0.50} ; C_e \geq 0.5 \quad \text{Ec. 3.2.2}$$

Exposición C. Centros de grandes ciudades con altas concentraciones de edificios altos. Al menos el 50 % de los edificios deben exceder de 4 pisos.

$$C_e = 0.40 \left(\frac{Z}{30}\right)^{0.72} ; C_e \geq 0.5 \quad \text{Ec. 3.2.3}$$

En estas ecuaciones, Z, es la altura sobre el suelo en metros.

#### Velocidad media en la altura total del edificio

La velocidad media en la altura total del edificio se calcula con la ecuación siguiente:

$$V_H = V\sqrt{C_e} \quad \text{Ec. 3.2.4}$$

donde:

V<sub>H</sub>, Velocidad media en la altura total del edificio.

V, Velocidad base de referencia.

#### Factor pico del efecto de la carga total

El factor pico de acuerdo a la Figura B-5 puede estimarse con la siguiente expresión:

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

Donde:

$g_p$ , Factor pico del efecto de la carga total.

$T = 3600$  segundos

$v$ , Tasa de fluctuación media

El factor pico da el número de desviaciones estándar en las que se espera que el efecto de la carga máxima supere el efecto de la carga media, y está dado en la Figura B-5 del *National Building Code of Canada* como una función de la tasa de fluctuación media,  $v$ , la cual puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$v = n_o \sqrt{\frac{sF}{sF + \beta B'}} \quad \text{Ec. 3.2.5}$$

Donde:

$n_o$  = Frecuencia natural de vibración, Hz

$s$  = Factor de reducción de tamaño, se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$s = \frac{\pi}{3} \left[ \frac{1}{1 + \frac{8n_o H}{3V_H}} \right] \left[ \frac{1}{1 + \frac{10n_o D}{V_H}} \right]$$

Donde:

$H$ , altura del edificio en metros.

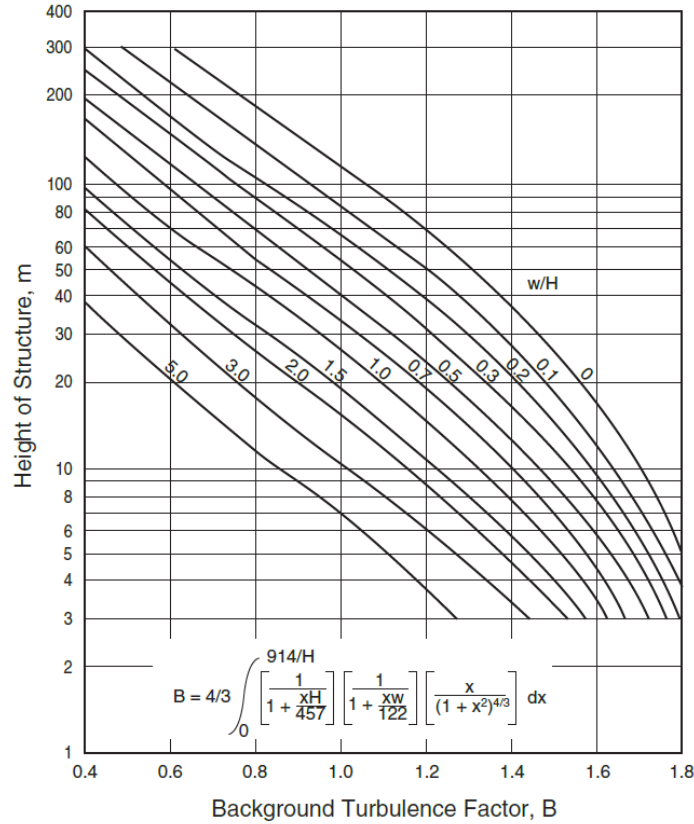
$D$ , ancho del edificio en metros.

$F$  = relación de energía de ráfaga de la frecuencia natural de la estructura, se tiene la siguiente expresión para estimar su valor:

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

$$x_0 = \left( \frac{1220n_o}{V_H} \right)$$

$B'$  = factor de turbulencia de fondo, obtenido a partir de la Figura 3.2.1 como función de la altura,  $H$ , y la anchura,  $W$ , de la cara de barlovento de la estructura  
 $\beta$  = Relación de amortiguamiento crítico.



**Figura 3.2.1.** Factor de turbulencia de fondo como una función del ancho y el alto de la estructura

**Aceleración pico en la dirección transversal del viento:**

De acuerdo al código canadiense el valor de la aceleración en sentido transversal está dado por la siguiente ecuación:

$$a_w = n_w^2 g_p \sqrt{BD} \left( \frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \right) \tag{Ec. 3.2.6}$$

donde:

B, base del edificio en metros.

D, ancho del edificio en metros.

$a_w$ , Aceleración pico en la dirección transversal del viento,  $m/s^2$ .

$\rho_B$ , Densidad media del edificio,  $kg/m^3$ .

$\beta_w$ , Fracción del amortiguamiento crítico en la dirección transversal.

$n_w$ , Frecuencia fundamental en la dirección transversal, Hz.

$g_p$ , Factor pico.

$g$ , Aceleración de la gravedad,  $9.81 m/s^2$ .

$a_r$ , Factor que se calcula con la siguiente expresión:

$$a_r = 78.5 \times 10^{-3} \left[ \frac{V_H}{n_w \sqrt{BD}} \right]^{3.3} ; \text{ en } kN/m^3$$

### 3.3 CÓDIGO JAPONÉS: Recommendations for Loads on Buildings (Diciembre 2005)

De acuerdo al documento *Recommendations for Loads Buildings*, en su versión en inglés de diciembre de 2005, se tiene el siguiente procedimiento para realizar la revisión de la aceleración transversal:

**Nota:**

El procedimiento del código japonés está calibrado para un periodo de retorno de 100 a 500 años, esto mencionado por el propio código en su apartado A6.1.5, en donde se expresa que el factor de conversión del periodo de retorno,  $k_{r,w}$ , tiene un gran error cuando los valores del periodo de retorno no se encuentran en este umbral.

**Revisión para determinar si se debe tomar en cuenta la carga de viento o la vibración inducida por el viento.**

De acuerdo al apartado 6.1.3 se debe hacer la revisión para edificios en los que se tienen en cuenta las cargas horizontales del viento sobre los marcos estructurales en las direcciones transversal y de torsión

$$\frac{H}{\sqrt{BD}} \geq 3 \quad \text{Ec. 3.3.1}$$

Donde

H, altura del edificio en metros.

B, base del edificio en metros.

D, ancho del edificio en metros.

**Cálculo del valor de la masa generalizada del edificio en la dirección transversal del viento**

De acuerdo al apartado A6.9.2 del Código japonés, la masa generalizada en la dirección transversal se calcula con la integral siguiente:

$$M_T = \int_0^H m_z \left(\frac{Z}{H}\right)^{2\beta} \quad \text{Ec. 3.3.2}$$

Donde:

Z, es la altura de referencia o de interés del edificio en metros,

$m_z$ , es la masa a la altura Z, que puede tomarse como:

$$m_z = \frac{m}{H}$$

$\beta$ , es el valor del exponente de la ley de potencia para el modo de vibración,  $\beta$ , se define en el apartado A6.9 *Factor de corrección de la forma del modo*, en el cual especifica:

*El factor de corrección de la forma del modo puede aplicarse con un rango de  $\beta$  de 0.2 a 4 para edificios convencionales, y con  $\beta$  entre 1 y 3,5 para una estructura de celosía cuando la función de forma del modo puede aproximarse mediante la función  $\mu=(Z/H)^\beta$ .*

A su vez en el apartado A6.9.2 *Procedimiento*, especifica que el valor de este exponente puede ser:  $\beta$  igual a 1 para un edificio convencional e igual a 2 para una estructura de celosía.

**Factor de exposición**

De acuerdo al apartado A6.1.5, el factor de exposición se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_r = \begin{cases} 1.7 \left( \frac{Z}{Z_G} \right)^\alpha & Z_b < Z \leq Z_G \\ 1.7 \left( \frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha & Z > Z_b \end{cases} \quad \text{Ec. 3.3.3}$$

Donde:

$Z_b$ ,  $Z_G$ ,  $\alpha$ : Parámetros para determinar el factor de exposición  $E_r$ , definidos en la Tabla 3.3.1, en metros.

**Tabla 3.3.1** Parámetros para determinar  $E_r$

Category	I	II	III	IV	V
$Z_b$ (m)	5	5	10	20	30
$Z_G$ (m)	250	350	450	550	650
$\alpha$	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

**Factor de topografía**

De acuerdo al apartado A6.1.5 el factor de topografía se calcula de la siguiente manera:

$$E_g = \begin{cases} (C_1 - 1) \left\{ C_2 \left( \frac{Z}{H_s} - C_3 \right) + 1 \right\} \exp \left\{ -C_2 \left( \frac{Z}{H_s} - C_3 \right) \right\} + 1; & \theta_s > 7.5^\circ \\ 1; & \theta_s \leq 7.5^\circ \end{cases} \quad \text{Ec. 3.3.4}$$

Donde el valor de  $\theta_s$ :

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{H_s}{2L_s} \quad \text{Ec. 3.3.5}$$

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  son parámetros para determinar el factor de topografía, que son dados en las Tablas 3.3.2 y 3.3.3 y dependen de la forma topográfica, la inclinación  $\theta_s$  y la distancia  $X_s$  (m) desde lo alto del rasgo topográfico del sitio de construcción. Cuando la inclinación  $\theta_s$  es mayor a  $60^\circ$ , el factor de topografía se asume igual al de  $60^\circ$ .

$H_s$  es la altura de la topografía de acuerdo a las Figuras 3.3.1 y 3.3.2

$L_s$  es la distancia horizontal desde la parte superior del elemento topográfico hasta el punto en que la altura es la mitad de la altura de la topografía, como se muestra en las figuras 3.3.1 y 3.3.2)

$Z$  es la altura sobre el suelo. Si  $Z < Z_b$  entonces esta altura se tomará como  $Z_b$ .

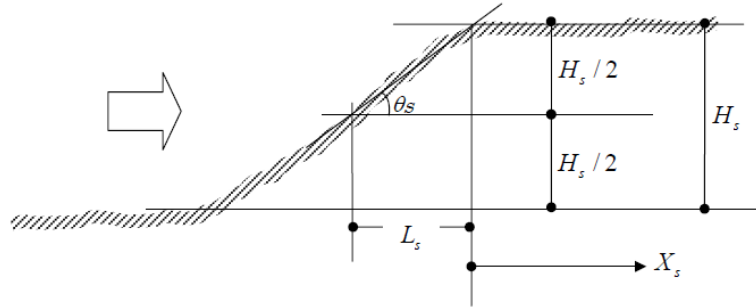


Figura 3.3.1 Escarpes

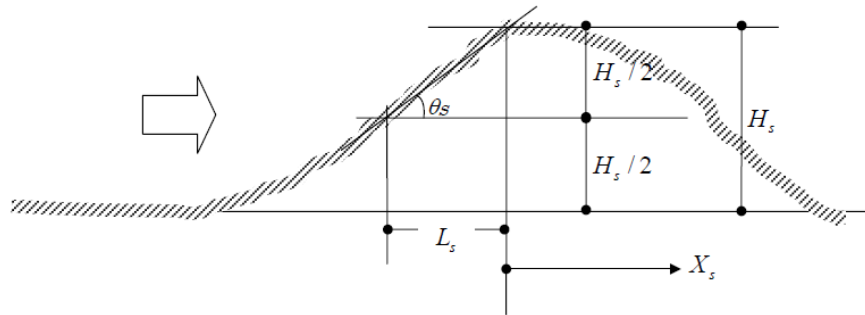


Figura 3.3.2 Topografía en forma de cresta

Tabla 3.3.2 Parámetros para determinar  $E_g$  (escarpes)

$\theta_s$		$X_s/H_s$									
		-4	-2	-1	-0.5	0	0.5	1	2	4	8
7.5°	$C_1$	1.15	1.3	1.5	1.5	1.6	1.45	1.3	1.3	1.2	1.15
	$C_2$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4
	$C_3$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
15°	$C_1$	0.4	1	1.2	1.55	2.1	1.65	1.5	1.3	1.2	1.15
	$C_2$	0.9	0	0.65	0.85	1	0.8	0.7	0.55	0.45	0.35
	$C_3$	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
30°	$C_1$	0.7	-0.5	1.05	1.1	1.3	1.3	1.25	1.2	1.15	1.1
	$C_2$	0.65	1.2	1.65	1.5	1.45	1.3	0.9	0.9	0.85	0.6
	$C_3$	-2	-2	1	0.8	0.3	0.3	0.5	0.7	1.2	1.4
45°	$C_1$	0.8	0	-3.5	1.1	1.2	1.35	1.3	1.2	1.15	1.1
	$C_2$	0.5	1	1.6	2	1.1	1.3	1.3	1.3	0.9	0.55
	$C_3$	-2	-2	-2	0.8	0.3	0.2	0.75	1.05	1.4	2
60°	$C_1$	0.6	0.1	-1.8	-2.4	1.2	1.4	1.35	1.25	1.15	1.1
	$C_2$	0.65	0.9	1.3	2.6	2	1.8	1.7	1.5	0.85	0.45
	$C_3$	-2	-2	-2	-1	0.5	0.5	0.8	1.2	1.9	3.1

**Tabla 3.3.3** Parámetros para determinar  $E_g$  (topografía en forma de cresta)

$\theta_s$		$X_s/H_s$									
		-4	-2	-1	-0.5	0	0.5	1	2	4	8
7.5°	$C_1$	1.1	1.2	1.35	1.35	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1
	$C_2$	1	1	1	1	1.5	1.2	1.1	2	1.6	0
	$C_3$	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.5	0.9	0
15°	$C_1$	1	1.05	1.2	1.25	1.3	1.4	1.3	1.25	0.35	0.65
	$C_2$	0	0	1	1	1	1.5	1.5	2	3	2
	$C_3$	0	0	0	0	0	0.5	0.6	1.1	0.2	0.3
30°	$C_1$	0.75	0.55	0.85	1	1.2	1.3	1.25	1.2	1.1	1.02
	$C_2$	1.5	2	2	0	1	2	2	1.6	1.7	1.7
	$C_3$	0	0	0	0	0	1.1	1.3	2.1	2.2	2.8
45°	$C_1$	0.75	0.55	0.2	0.75	1.15	1.2	1.15	1.12	1.1	1.02
	$C_2$	1.5	2	2	3	1	2.5	2.5	2	1.6	1.3
	$C_3$	0	0	0	0	0	1.2	1.9	2.2	2.5	3.2
60°	$C_1$	0.75	0.55	0.2	0.2	1.15	1.12	1.15	1.12	1.1	1.02
	$C_2$	1.5	1.5	1.8	3	1	2.2	2.5	2	1.6	1.3
	$C_3$	0	0	0	0	0	1.8	2	2.3	2.6	3.4

**Nota:** Para una inclinación  $\theta_s$  en particular y una relación  $X_s/H_s$ , el factor de topografía es calculado por interpolación lineal de los valores de inclinación y ubicaciones horizontales más cercanos.

#### Factor del perfil de velocidad de viento a la altura de referencia H

Una vez definidos los factores de topografía y de exposición se obtiene el factor de perfil de velocidad de viento de acuerdo al apartado A6.1.5:

$$E_H = E_r E_g \quad \text{Ec. 3.3.6}$$

#### Factor de conversión del periodo de retorno

De acuerdo al apartado A6.1.7 el factor de conversión del periodo de retorno,  $K_{rW}$ , se calcula con la ecuación 3.3.7:

$$K_{rW} = 0.63(\lambda_u - 1) \ln T_r - 2.9 \lambda_u + 3.9 \quad \text{Ec. 3.3.7}$$

Donde:

$$\lambda_u = \frac{U_{500}}{U_0}$$

$U_0$ , velocidad básica del viento en función de la ubicación geográfica.

$U_{500}$ , velocidad media del viento en 10 minutos con una periodicidad de 500 años a 10 m sobre el suelo en un terreno plano y abierto, dando valores para el Japón en la Fig. A6.4 del *Recommendations for Loads Buildings*.

#### Velocidad de diseño

De acuerdo al apartado A6.1.2 la velocidad de diseño se calcula para cada dirección con la ecuación siguiente:

$$U_H = U_0 K_D E_H K_{rW} \quad \text{Ec. 3.3.8}$$

Donde:

$K_D$ , factor de direccionalidad del viento.

Para el caso en el que se tenga un  $T_r = 1$  año la ecuación pasa a ser:

$$U_H = U_0 E_H$$

### Velocidad de presión

De acuerdo al apartado A6.1.1 la velocidad de presión de diseño,  $q_H$  (N/m<sup>2</sup>), se calcula con:

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \quad \text{Ec. 3.3.9}$$

Donde:

$\rho = 1.22$  Kg/m<sup>3</sup> (Densidad media del aire).

### Resonancia del vórtice e inestabilidad aeroelástica

De acuerdo al apartado 6.1.3 se debe verificar si la resonancia de vórtice y la inestabilidad aeroelástica tienen que revisarse con pruebas en túnel de viento o, si por el contrario, es factible no hacerlas y seguir utilizando el procedimiento mostrado en el código japonés.

La revisión en caso de edificios de sección rectangular es la siguiente:

$$\frac{H}{\sqrt{BD}} \geq 4 \quad y \quad \left( \frac{U_H}{f_T \sqrt{BD}} \geq 0.83 U_{Lcr}^* \right) \quad \text{Ec. 3.3.10}$$

Donde:

$f_T$ , frecuencia natural del primer modo en dirección transversal al viento.

$U_{Lcr}^*$  velocidad del viento crítica adimensional para la inestabilidad aeroelástica en la dirección del viento transversal calculada a partir de la Tabla 3.3.4

**Tabla 3.3.4** Velocidad del viento critica adimensional para la inestabilidad aeroelástica en la dirección transversal del viento,  $U_{Lcr}^*$

Flat terrain categories	Side ratio $D/B$	Scruton number $\delta_L$ <sup>Note)</sup>	Critical speed $U_{Lcr}^*$
I, II	$D/B \leq 0.8$	$\delta_L \leq 0.7$	$16 \delta_L$
		$\delta_L > 0.7$	11
	$0.8 < D/B \leq 1.5$	all	$1.2 \delta_L + 7.3$
	$1.5 < D/B \leq 2.5$	$\delta_L \leq 0.2$	2.3
		$0.2 < \delta_L \leq 0.8$	12
		$\delta_L > 0.8$	$15 \delta_L$
$D/B > 2.5$	$\delta_L \leq 0.4$	3.7	
	$\delta_L > 0.4$	not necessary to evaluate	
III, IV, V	$D/B \leq 0.8$	all	$4.5 \delta_L + 6.7$
	$0.8 < D/B \leq 1.2$	all	$0.7 \delta_L + 8.8$
	$D/B > 1.2$	all	11

De acuerdo a la Tabla 3.3.4, tomando en cuenta la categoría de terreno del lugar y la relación lateral  $D/B$ , se utilizará la ecuación para el cálculo de  $U_{Lcr}^*$  que concuerde con estos parámetros:

Donde:

$$\delta_L = \frac{\zeta_L m}{3 \rho B D H}$$



$\zeta_L$ , relación de amortiguación crítica del primer modo transversal.  
 $m$ , masa total del edificio.

### Revisión del ámbito de aplicación

De acuerdo a la sección A6.4.1, para estimar las cargas de viento horizontal en sentido transversal sobre marcos estructurales, el procedimiento puede aplicarse si satisface las siguientes condiciones cuando el viento es normal a la fachada (como se ha supuesto en este ejemplo).

I) *Los edificios tienen una sección rectangular uniforme desde abajo hasta arriba*

$$II) \frac{H}{\sqrt{BD}} \leq 6$$

$$III) 0.2 \leq D/B \leq 5$$

$$IV) \frac{U_H}{f_L \sqrt{BD}} \leq 10$$

### Factores para el cálculo de la aceleración transversal (coeficiente de momento de volteo, $C_T$ y factor de resonancia, $R_T$ )

En el apartado A6.4.2 se tiene el procedimiento de cálculo para obtener los factores necesarios para el cálculo de la aceleración transversal.

Para el caso del coeficiente de momento de volteo,  $C'_T$ , se tiene la ecuación:

$$C'_T = 0.0082 \left(\frac{D}{B}\right)^3 - 0.07 \left(\frac{D}{B}\right)^2 + 0.22 \left(\frac{D}{B}\right)$$

El factor de resonancia,  $R_T$ , se calcula con:

$$R_T = \frac{\pi F_T}{4\zeta_L}$$

Donde:

$$F_T = \sum_{j=1}^m \frac{4k_j(1 + 0.6\beta_j)\beta_j}{\pi} \frac{\left(\frac{f_T}{f_{sj}}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{f_T}{f_{sj}}\right)^2\right\}^2 + 4\beta_j^2 \left(\frac{f_T}{f_{sj}}\right)^2}$$

$$k_1 = 0.85$$

$$k_2 = 0.02$$

$$m = \begin{cases} 1, & \frac{D}{B} < 3 \\ 2, & \frac{D}{B} \geq 3 \end{cases}$$

$$f_{s1} = \frac{0.12}{\left\{1 + 0.38 \left(\frac{D}{B}\right)^2\right\}^{0.89}} \frac{U_H}{B}$$

$$f_{s2} = \frac{0.56}{\left(\frac{D}{B}\right)^{0.85}} \frac{U_H}{B}$$

$$\beta_1 = \frac{\left(\frac{D}{B}\right)^4 + 2.3 \left(\frac{D}{B}\right)^2}{\left\{2.4 \left(\frac{D}{B}\right)^4 - 9.2 \left(\frac{D}{B}\right)^3 + 18 \left(\frac{D}{B}\right)^2 + 9.5 \left(\frac{D}{B}\right) - 0.15\right\}} + \frac{0.12}{\frac{D}{B}}$$

$$\beta_2 = \frac{0.28}{\left(\frac{D}{B}\right)^{0.34}}$$

### Respuesta de aceleración máxima en la dirección transversal a la altura del edificio

El valor de la respuesta de aceleración máxima se define en el apartado A6.10.3 con la siguiente ecuación:

$$a_{Lmax} = \frac{q_H g_{aL} B H C'_T \lambda \sqrt{R_T}}{M_T} \quad \text{Ec. 3.3.11}$$

Donde:

$$g_{aT} = \sqrt{2 \ln(600 f_T) + 1.2}$$

Y el valor del factor de corrección de modo de la fuerza general del viento  $\lambda$ :

$$\lambda = 1 - 0.4 \ln \beta$$

Donde:

$\beta$ , es el exponente de la ley de potencia para el modo de vibración, cuyo valor es definido al principio de la presente sección.

### 3.4 ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS

Para la selección de la metodología a adaptar para su aplicación en la Ciudad de México, se desarrolló un ejemplo con un código desarrollado en el programa MATLAB, a partir de los datos mostrados en la Tabla 3.4.1 para cada uno de los procedimientos de los tres códigos, los resultados se presentan a continuación.:

**Tabla 3.4.1.** Evaluación de ejemplo en las tres metodologías analizadas.

CODIGO ITALIANO		CODIGO CANADIENSE		CODIGO JAPONÉS	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
<i>DATOS INICIALES</i>					
Altura del edificio (m)	74.4	Altura del edificio (m)	74.4	Altura del edificio (m)	74.4
Base del edificio (m)	24	Base del edificio (m)	24	Base del edificio (m)	24
Ancho del edificio (m)	24	Ancho del edificio (m)	24	Ancho del edificio (m)	24
Tiempo de observación (s)	600				
Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )	1.23	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )	1.23	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )	1.23
Velocidad base de referencia (m/s)	23	Velocidad del viento (m/s)	23	Velocidad base, U <sub>0</sub> (m/s)	23
Periodo de retorno (años)	10			Periodo de retorno (años)	100
Frecuencia transversal (Hz)	0.29	Frecuencia transversal (Hz)	0.29	Frecuencia transversal (Hz)	0.29
Amortiguamiento	0.02	Amortiguamiento	0.02	Amortiguamiento	0.02
Densidad del edificio (kg/m <sup>3</sup> )	200	Densidad del edificio (kg/m <sup>3</sup> )	200	Densidad del edificio (kg/m <sup>3</sup> )	200
Masa total del edificio (kg)	8570880			Masa total del edificio (kg)	8570880
		Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> )	9.81		0
				Altura topográfica (m)	45
				Parámetro L <sub>s</sub> (m)	1
<i>PROCEDIMIENTO</i>					
Coeficiente de topografía	1	Factor de exposición	1.21	Masa generalizada del edificio (kg)	2856960
$\Phi_{1(h)}$	1	Velocidad media en la altura H (m/s)	25.3	Z <sub>b</sub> (m)	20
$\Phi_{1(z)}$	0.9583	Factor de reducción de tamaño, s	0.0853	Z <sub>G</sub> (m)	550
Masa generalizada del edificio (kg)	2856960	X <sub>0</sub>	13.9842	$\alpha$	0.27
C <sub>r</sub>	0.9031	Relación de energía de ráfaga de la frecuencia natural de la estructura	0.1711	Factor de exposición, E <sub>r</sub>	0.9905
Velocidad de referencia (m/s)	20.77	Factor de turbulencia de fondo	0.86	$\theta_s$ (°)	87.455
Z <sub>min</sub> (m)	8	Tasa de fluctuación media, v	0.1965	C <sub>1</sub>	1.15
Z <sub>0</sub> (m)	0.3			C <sub>2</sub>	1

$K_r$	0.17	$C_s$	0
$C_m$	0.9373	Factor de topografía, $E_g$	1.0762
Velocidad media (m/s)	19.467	Factor del perfil de velocidad	1.066
		U500 (m/s)	38
Coefficiente de fuerza aerodinámica	0.1572	$\lambda_u$	1.6522
$n_{s1}$ (Hz)	0.0731	Factor de conversión del periodo de retorno, $K_{rW}$	1.0008
$n_{s2}$ (Hz)	0.4542	Velocidad de diseño (m/s)	24.538
$\beta_1$	0.2806	Velocidad de presión (m/s)	370.3
$\beta_2$	0.28	Coefficiente de momento de volteo	0.1572
m	1	m	1
$S_T$	0.0251	$f_{s1}$ (Hz)	0.0921
$R_T$	0.993	$\beta_1$	0.2806
		Factor $F_T$	0.0426
		Factor de resonancia, $F_T$	1.673
Factor pico, $g_T$	3.3919	Factor pico, $g_p$	3.7818
Factor pico, $g_{aT}$		Factor pico, $g_{aT}$	3.3938
Desviación estándar de la aceleración transversal a la altura z	0.0218		

---

RESULTADO

---

Aceleración transversal máxima (mili-g)	7.54	Aceleración transversal máxima (mili-g)	15.57	Aceleración transversal máxima (mili-g)	16.28
---	------	---	-------	---	-------

---

A partir de los resultados entregados en por la Tabla 3.4.1 se puede concluir lo siguiente:

***Código japonés***

En primer lugar, la metodología entregada por el código japonés no permite valores de periodo de retorno inferiores a 100 años, proponiendo un intervalo de uso de 100 a 500 años, esto para el cálculo del factor de conversión del periodo de retorno,  $K_{rW}$ , lo anterior es mencionado en el propio código en su apartado A6.1.5 (como ya se había mencionado en el apartado de *Datos para el ejemplo* de este mismo escrito), esto se verificó utilizando el mismo edificio y datos del ejemplo mostrados en la tabla anterior pero variando el periodo de retorno y comparándolos con las aceleraciones resultantes del procedimiento del código japonés con las obtenidas con los mismos periodos para el código italiano, como se muestra en la Tabla 3.4.2:

**Tabla 3.4.2.** Comparación de las aceleraciones del código japonés e italiano

Tr (años)	CÓDIGO JAPONÉS		CÓDIGO ITALIANO
	$K_{rW}$	$a_{Tmax}$ (mili-g)	$a_{Tmax}$ (mili-g)
1	-0.8913	16.3057	4.2439
5	-23	0.1828	6.3621
10	0.0548	0.0025	7.5379
20	0.3396	0.5910	8.7357
30	0.5061	1.9811	9.4551
40	0.6243	3.7615	9.9755
50	0.716	5.7347	10.3615
75	0.7909	7.8059	11.6027
100	1.0008	16.3482	12.5428
150	1.1674	26.7995	13.9561
200	1.2856	36.7454	15.0246
300	1.4522	55.2251	16.6275
400	1.5704	72.1898	17.868
500	1.6621	87.9841	18.8174
600	1.737	102.8434	19.6472
700	1.8003	116.9318	20.3692
800	1.8552	130.3682	21.0102
900	1.9036	143.2420	21.5876
1000	1.9469	155.6222	22.1139

Graficando los resultados de la Tabla 3.4.2 para los primeros 100 años de periodo de retorno se muestran en las Figuras 3.4.1 y 3.4.2.

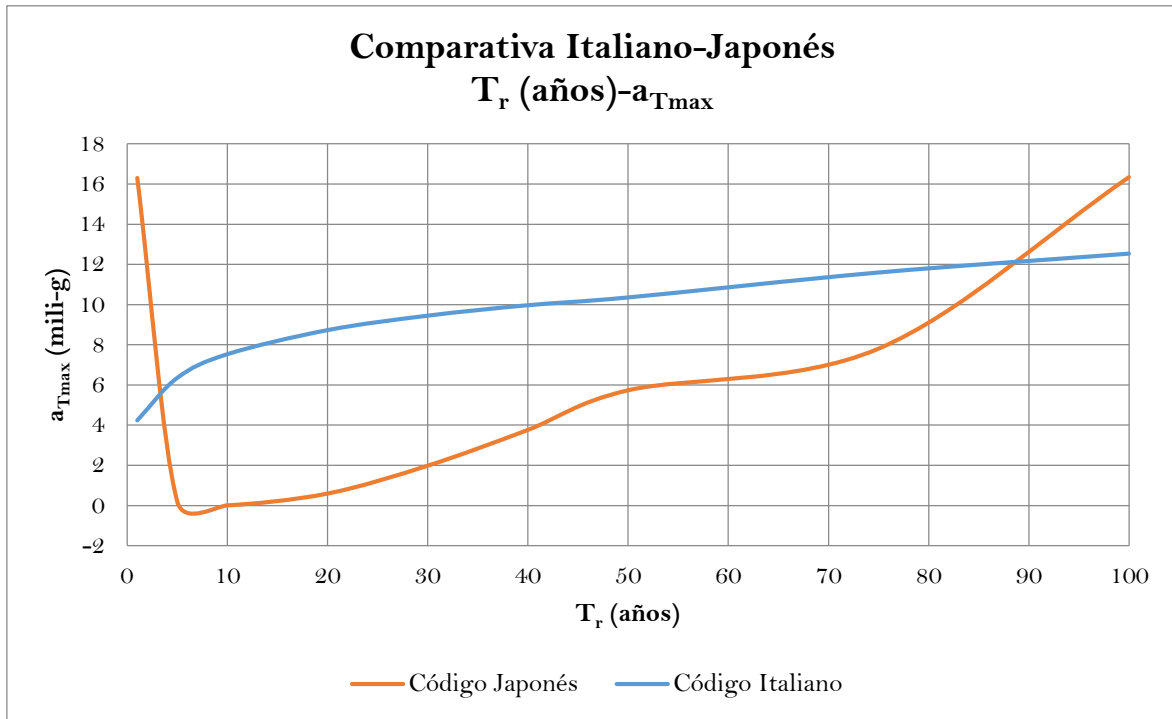


Figura 3.4.1. Comparativa de las aceleraciones resultantes del código japonés e italiano para un  $T_r$  de 1 a 100 años.

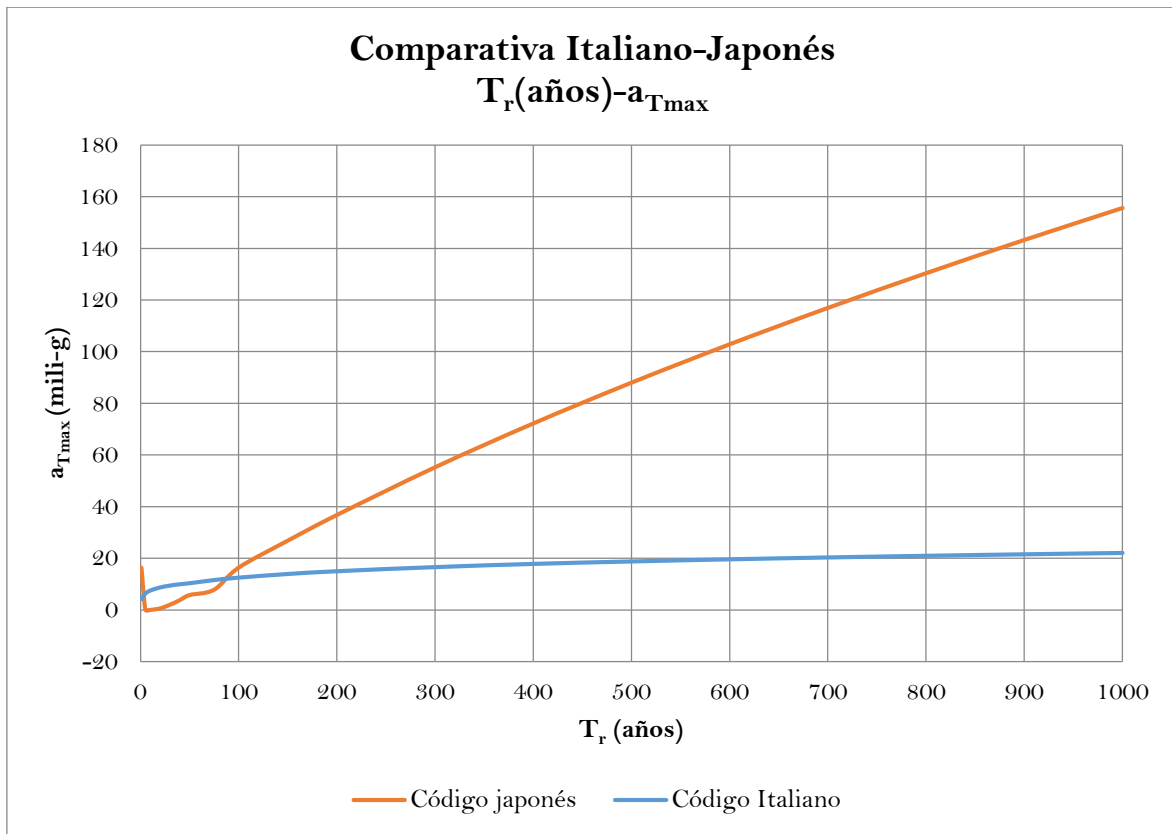


Figura 3.4.2. Comparativa de las aceleraciones resultantes del código japonés e italiano para un  $T_r$  de 1 a 1000 años.

Como se puede notar, tanto en la Tabla 3.4.2 así como en la Figura 3.4.1, los valores que nos atañen para un periodo de retorno de 0 a 100 años en el código japonés se tienen valores que se incrementan y disminuyen en forma un tanto irregular, esto puede ser debido al error que tienen las expresiones del código japonés para este intervalo de periodos de retorno, y es solo hasta después de pasados los 100 años que toman valores con incrementos de manera más lineal, a diferencia del código italiano que desde que se toma un  $T_r$  de un año se comienza con incrementos regulares (lineales) en los resultados de la aceleración.

A partir de lo anterior se hacen dos consideraciones, la primera es que el intervalo buscado de valores de periodo de retorno es máximo a 100 años, ya que en la práctica mexicana se utilizan periodos de retorno, comúnmente de 10 años para realizar revisiones de este tipo. La segunda es que los valores de aceleración dados por el procedimiento japonés son bastante más altos a partir de un periodo de retorno de 100 años y menores para la mayor parte de los periodos de retorno inferiores a este periodo de retorno; en términos prácticos esta metodología se considera no conveniente para los objetivos que busca el presente trabajo.

### ***Código canadiense***

El código canadiense, a diferencia del japonés, puede utilizarse para diferentes periodos de retorno, este se ve reflejado en la velocidad del viento asociada a un periodo de retorno específico, tal y como puede verse en las expresiones para el cálculo de la aceleración transversal. Sin embargo, como se observa en la tabla de resultados la magnitud de la aceleración transversal obtenida con esta metodología para un periodo de retorno de 10 años es de 15.57 mili-g, lo que es aproximadamente el 95.6 % de la aceleración resultante con la metodología del código japonés, sin embargo, se debe recordar que esta última se obtuvo para un periodo de retorno de 100 años; por lo que se puede concluir que los valores de aceleración dados por el código canadiense son bastante altos o conservadores, lo que podría llevar a sobredimensionamientos y, con ello, a sobrecostos en los edificios altos en caso de realizar su adaptación a una futura metodología mexicana para la revisión de la aceleración transversal. Es por esta razón que se decide descartar la adaptación de esta metodología para su aplicación en la Ciudad de México.

### ***Código italiano***

El código italiano, tal y como el código canadiense, permite la obtención de aceleraciones con periodos de retorno menores a 100 años con valores con incrementos regulares, esto se ha mostrado en las figuras 3.4.1 y 3.4.2. Además de que resultan en magnitudes de aceleración transversal menos conservadoras que con las otras dos metodologías analizadas.

---

Es por estas razones que se tomó la decisión de realizar la adaptación del procedimiento mostrado en el código italiano para conformar una propuesta de una metodología aplicable a la Ciudad de México.



## CAPÍTULO 4

### FORMULACIÓN DE UN FACTOR DE ACELERACIÓN PARA EVALUAR LA ACELERACIÓN TRANSVERSAL INDUCIDA POR EL VIENTO

Una vez que se ha seleccionado el procedimiento del código italiano se procede a su adaptación a las condiciones de la Ciudad de México, para ello se realiza la formulación de un factor de aceleración para evaluar la aceleración inducida por el viento con los intervalos de valores de los coeficientes que son los usados en la Ciudad de México, esto también con base en las ecuaciones ya descritas en el procedimiento seleccionado. A continuación, se presenta el desarrollo algebraico para relacionar el factor de aceleración trasversal y la aceleración transversal.

Retomando la ecuación 3.1.3.18; se sustituyen las ecuaciones 3.1.3.16 y 3.1.3.17 en la ecuación 3.1.3.18 para obtener:

$$a_{pT}(Z) = g_T \cdot \frac{0.5 \cdot \rho \cdot V_m^2(H) \cdot B \cdot H}{m_T} C_T \cdot R_T \cdot \phi_T(H) \cdot \phi_T(Z) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Ahora bien, suponiendo que la altura de interés es la altura total del edificio ( $Z=H$ ), se tendría que los modos de vibrar en el sentido transversal serían:

$$\phi_1(Z) = \left(\frac{Z}{H}\right)^\zeta = 1.0$$

Quedando la ecuación 4.2 como:

$$a_{pT} = g_T(n_T, T) \cdot \frac{0.5 \cdot \rho \cdot V_m^2(H)(V_r, C_m) \cdot B \cdot H}{m_T(Z, H, m(s))} C_T(D, B) \cdot R_T(S_T, \xi_T) \quad \text{Ec. 4.2}$$

Partiendo de que el sistema se puede expresar como un sistema de un solo grado de libertad se puede realizar lo siguiente:

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde:

$\omega$  = frecuencia angular.

$f$  = frecuencia.

$k$  = rigidez.

$m$  = masa.

En el sentido transversal y elevando al cuadrado ambas partes:

$$4\pi^2 f_T^2 = \frac{k_T}{m_T}$$

Despejando a la masa en el sentido transversal, se tendría:

$$\frac{1}{m_T} = \frac{4\pi^2 f_T^2}{k_T}$$

Sustituyendo la masa transversal en la ecuación 4.2:

$$a_{pT} = g_T \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2(h) \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot 4\pi^2 f_T^2}{k_T} \cdot R_T \quad \text{Ec. 4.3}$$

Considerando que se tiene incertidumbre en  $V$ ,  $f_L$ ,  $a_L$ ,  $\xi_L$  y sustituyendo el valor de  $R_T$ :

$$R_T = \sqrt{\frac{\pi \cdot S_T}{4\xi_T}}$$

$$a_{pT} = g_T \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot V^2(h) \cdot 4\pi^2 f_T^2}{k_T} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot S_T}{4\xi_T}} \quad \text{Ec. 4.4}$$

A partir de aquí se debe calibrar la ecuación con el término  $F_{AT}$  para las probabilidades tolerables seleccionadas de percepción de movimiento inducido por el viento y adoptando una aceleración crítica como de servicio:

$$a_{pTcr} = F_{aT} \left[ g_T \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot V^2(h) \cdot 4\pi^2 f_T^2}{k_T} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot S_T}{4\xi_T}} \right]_N \quad \text{Ec. 4.5}$$

De la ecuación 4.5 se realiza el despeje de  $4\pi^2$ :

$$4\pi^2 = \left[ \frac{2a_{pTcr}}{F_{aT} \cdot g_T \cdot f_T^2} \cdot \frac{k_T}{\rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot V^2(h)} \cdot \sqrt{\frac{4\xi_T}{\pi \cdot S_T}} \right]_N$$

El caso nominal toma los valores medios de las variables inciertas

$$4\pi^2 = \frac{2a_{pTcr}}{F_{aT} \cdot g_T(m_{f_T}) \cdot m_{f_T}^2} \cdot \frac{k_T}{\rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot V_T^2} \cdot \sqrt{\frac{4m_{\xi_T}}{\pi \cdot S_T(m_{\xi}, m_{f_T})}} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Sustituyendo la ecuación 4.5 en la ecuación 4.2, se obtiene:

$$\frac{a_{pT}}{g_T} = \sigma_{aT} = \left[ \frac{\rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot V^2(h) \cdot f_T^2}{2 \cdot k_T} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot S_T(\tilde{f})}{4\xi_T}} \right] \cdot \frac{2a_{pTcr}}{F_{aT} \cdot g_T(m_{f_T}) \cdot m_{f_T}^2} \cdot \frac{k_T}{\rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot V_T^2} \cdot \sqrt{\frac{4m_{\xi_T}}{\pi \cdot S_T(m_{f_T})}}$$

Asumiremos incertidumbre en los siguientes productos:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \cdot V^2$$

Las unidades de esto serían:

$$\frac{kg}{m^3} \cdot m \cdot m \cdot \frac{m^2}{s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2} = N$$

\*Todo el producto es una variable aleatoria.

$$\sigma_{aT} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T}{\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \right]_N} \cdot \frac{V^2}{V_T^2} \cdot \frac{f_T^2}{m_{fT}^2} \cdot \sqrt{\frac{S_T(\tilde{f})}{S_T(m_{fT})}} \cdot \sqrt{\frac{m_{\xi T}}{\xi_T}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot 4}{4 \cdot \pi}} \cdot \frac{a_{pTcr}}{F_{aT} \cdot g_T(m_{fT})} \cdot \frac{[k_T]_N}{k_T}$$

\*La rigidez al considerar que no tiene incertidumbre se elimina.

Quedando de forma simplificada la siguiente ecuación para la desviación estándar.

$$\sigma_{aT} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T}{\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \right]_N} \cdot \frac{V^2}{V_T^2} \cdot \frac{f_T^2}{m_{fT}^2} \cdot \sqrt{\frac{S_T(\tilde{f})}{S_T(m_{fT})}} \cdot \sqrt{\frac{m_{\xi T}}{\xi_T}} \cdot \frac{a_{pTcr}}{F_{aT} \cdot g_T(m_{fT})} \quad Ec. 4.7$$

Recordamos las variables normalizadas:

$$\tilde{f}_T = \frac{f_T}{m_{fT}}; \tilde{\xi}_T = \frac{\xi_T}{m_{\xi}}; \tilde{V}_T = \frac{V}{m_V}$$

Y sustituyendo estas variables en la ecuación 4.7, la ecuación queda:

$$\sigma_{aT} = \frac{a_{pTcr} \cdot \tilde{f}_T^2}{F_{aT} \cdot g_T(m_{fT})} \cdot \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T}{\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \right]_N} \cdot \sqrt{\frac{1}{\tilde{\xi}_T}} \cdot \sqrt{\frac{S_T(\tilde{f}_T)}{S_T(m_{fT})}} \cdot \frac{(\tilde{V} \cdot m_V)^2}{V_T^2} \quad Ec. 4.8$$

Introducimos una nueva variable que agrupe a las variables que forman el producto en el que se consideró incertidumbre anteriormente:

$$\zeta_T = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T}{\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot B \cdot H \cdot C_T \right]_N}$$

Definimos a la aceleración normalizada como el cociente de la aceleración transversal y la desviación estándar:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_T &= \frac{a_T}{\sigma_{aT}} \\ a_T &= \tilde{a}_T \cdot \sigma_{aT} \end{aligned} \quad Ec. 4.9$$

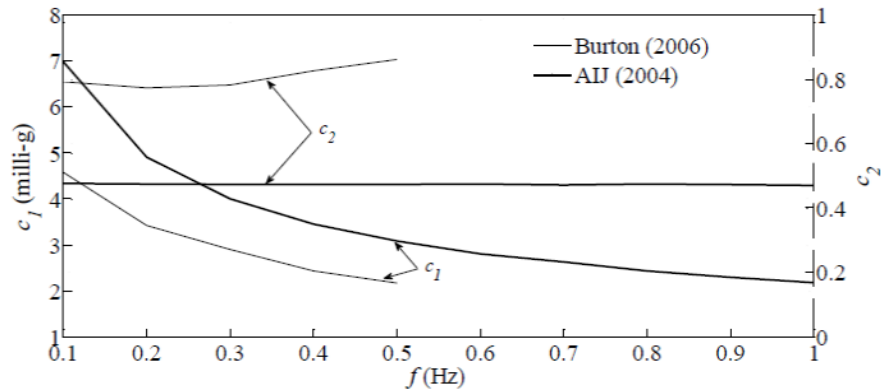
Tomando en cuenta la ecuación 4.9 y considerando la aceleración como la crítica, se tiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_{aT} = \frac{a_{pTcr} \cdot \tilde{f}_T^2}{F_{aT} \cdot g_T(m_{fT})} \cdot \zeta_T \cdot \sqrt{\frac{1}{\tilde{\xi}_T}} \cdot \sqrt{\frac{S_T(\tilde{f}_T)}{S_T(m_{fT})}} \cdot \left( \frac{\tilde{V} \cdot m_V}{V_T} \right)^2 \quad Ec. 4.10$$

De acuerdo a Burton (2006), la probabilidad condicional de percepción de la aceleración para un nivel dado de aceleración normalizada,  $\widetilde{a}_T$ , en este caso, estaría dada por la siguiente ecuación:

$$P_{fP|\widetilde{a}_T}(\widetilde{a}_L) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{\widetilde{a}_T}{C_1}\right)}{C_2}\right)$$

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son parámetros del modelo que dependen de la frecuencia tal y como se muestra en la Figura 4.1, los valores para  $f=0.1$  Hz se obtienen por extrapolación de las líneas presentadas en la dicha figura.



**Figura 4.1** Variación de  $C_1$  y  $C_2$  con la frecuencia (adaptada de Pozos-Estrada, A. (2018) "A simple procedure to evaluate the wind-induced acceleration in tall buildings: an application to Mexico").

Considerando las variables que afectan los niveles de aceleración en una edificación como lo son la incertidumbre en la aceleración pico, las propiedades dinámicas de la estructura, las características del viento y el nivel de la percepción humana del movimiento a través del teorema de probabilidad total, la probabilidad incondicional de percepción del movimiento inducido por el viento por parte de los ocupantes o usuarios de una edificación,  $P_p$ , está dada por la ecuación siguiente:

$$P_{fP} = \int \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{\widetilde{a}_T H(\tilde{v})}{C_1}\right)}{C_2}\right) f_{\widetilde{a}_T}(\widetilde{a}_T) f_{\tilde{f}_T}(\tilde{f}_T) f_{\tilde{v}}(\tilde{v}) f_{\tilde{\xi}_T}(\tilde{\xi}_T) f_{\zeta_T}(\zeta_T) d_{\widetilde{a}_T} d_{\tilde{f}_T} d_{\tilde{v}} d_{\tilde{\xi}_T} d_{\zeta_T} \quad \text{Ec. 4.11}$$

Donde el valor de  $H$  se calcularía con la ecuación siguiente:

$$H(\tilde{v}) = \frac{a_{pTcr} \cdot \tilde{f}_T^2}{F_{aT} \cdot g_T(m_{f_T})} \cdot \zeta_T \cdot \sqrt{\frac{1}{\tilde{\xi}_T}} \cdot \sqrt{\frac{S_T(\tilde{f}_T)}{S_T(m_{f_T})}} \cdot \left(\frac{\tilde{V} \cdot m_V}{V_T}\right)^2 \quad \text{Ec. 4.12}$$

La Ec. 4.12 será empleada en el siguiente capítulo para realizar la calibración de los factores de aceleración transversal.

#### 4.1 COMPARATIVA DE LAS FUNCIONES DE DENSIDAD ESPECTRAL

Con el fin de analizar la forma en que se comporta la densidad espectral expresada en el código italiano se realiza el desarrollo y comparativa de esta con la dada en el Manual de Obras Civiles 2020 (MDCO) para ello se recopila la metodología de este último.

*Procedimiento para el cálculo de la Función de Densidad Espectral según el MODC 2020:*

El siguiente procedimiento está descrito en el apartado 4.4.1 *Factor de respuesta de ráfaga para estructuras prismáticas* del manual, este procedimiento es válido para las condiciones descritas en este mismo apartado, para el caso que se aborda se considera que las estructuras cumplen dichos requisitos,

Datos necesarios para el cálculo son los siguientes:

$Z_s$ , Altura de referencia.

$Z_{min}$ , parámetro de altura.

$\bar{\alpha}$ , exponente que define la variación de la longitud de escala con la altura.

Todos estos valores se obtienen de la Tabla 4.2 del MODC 2020:

Tabla 4.2 Valores de los parámetros  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{d}$ ,  $z_0$ ,  $z_{min}$  y  $z_{max}$ .

Categoría del terreno	$\bar{d}$	$\bar{\alpha}$	$z_0$ (m)	$z_{min}$ (m)	$z_{max}$ (m)
1	0.12	0.44	0.001	1	200
2	0.17	0.52	0.020	2	200
3	0.25	0.61	0.200	5	200
4	0.39	0.67	1.000	10	200

$n_{1x}$ , frecuencia fundamental del modo de vibrar, en Hz.

$V'_D(Z_s)$ , velocidad media, en m/s, evaluada a la altura de referencia,  $Z_s$ .

Cálculo de la Longitud de la escala de turbulencia:

$$L(z_s) = 300 \left( \frac{z_{min}}{200} \right)^{\bar{\alpha}} \text{ para } z_s < z_{min} \quad (4.8.a)$$

$$L(z_s) = 300 \left( \frac{z_s}{200} \right)^{\bar{\alpha}} \text{ para } z_s \geq z_{min} \quad (4.8.b)$$

La función de densidad espectral sería:

$$S_T(z_s, n_{1x}) = \frac{6.8 \left( \frac{n_{1x} \cdot L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)}{\left[ 1 + 10.2 \left( \frac{n_{1x} \cdot L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right) \right]^{5/3}} \quad (4.10)$$

Con este procedimiento definido y el del código italiano descrito con anterioridad se puede proceder a realizar la comparativa de los resultados otorgados por ambos; para ello se hace variar el valor de la frecuencia transversal y se toman los siguientes valores a partir de un edificio de ejemplo:

$$Z_s = 74.4 \text{ m}$$

$$V'_D(Z_s) = 19.4505 \text{ m/s}$$

$$Z_{\min} = 10 \text{ m}$$

$$D = 24 \text{ m}$$

$\bar{a} = 0.67$  (considerando una categoría del terreno 4)  $B = 24 \text{ m}$  (en el caso de  $D/B > 3$  se usó 6 m)

Los valores de la frecuencia transversal se hacen variar de 0.00 – 1.00 Hz con intervalos de 0.01 Hz.

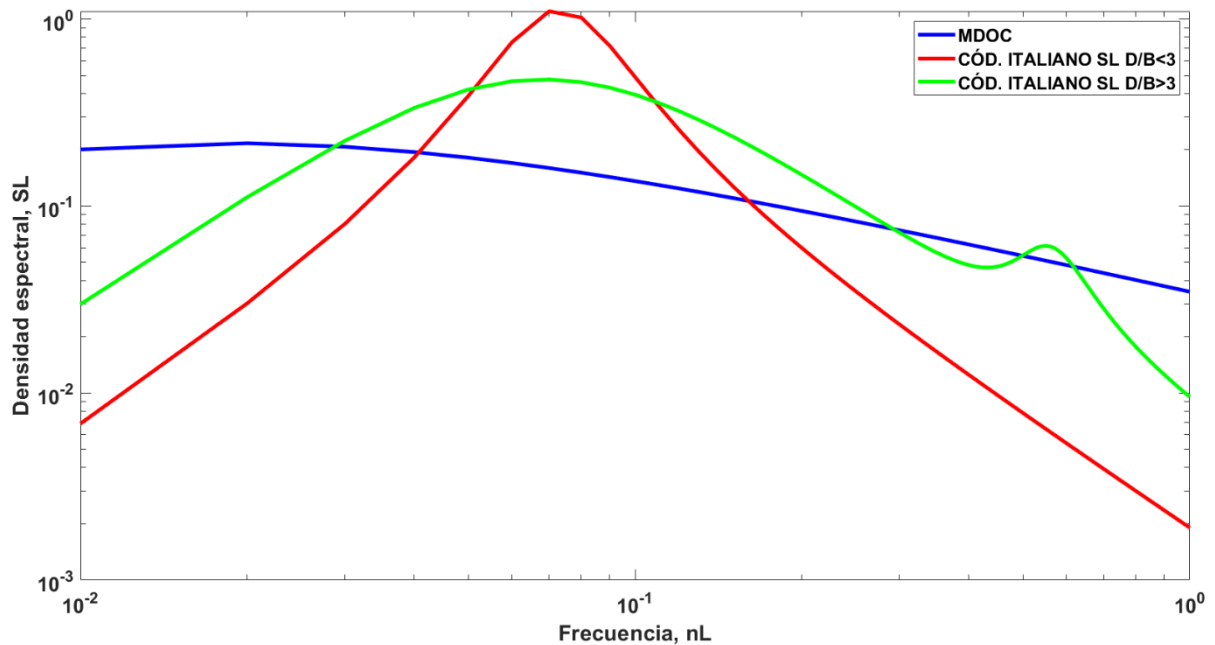
**Tabla 3.4.1.1** Comparativa de valores de la función de densidad espectral para el MDOC y el código italiano.

	MDOC	C. ITAL.			MDOC	C. ITAL.	
$n_{1x}$	$S_L$	$S_T D/B < 3$	$S_T D/B > 3$	$n_{1x}$	$S_L$	$S_T D/B < 3$	$S_T D/B > 3$
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.37	0.0654	0.0465	0.0527
0.01	0.2009	0.0299	0.0299	0.38	0.0643	0.0442	0.0512
0.02	0.2169	0.1119	0.1119	0.39	0.0633	0.0420	0.0501
0.03	0.2076	0.2239	0.2239	0.40	0.0623	0.0400	0.0493
0.04	0.1944	0.3355	0.3355	0.41	0.0614	0.0381	0.0489
0.05	0.1816	0.4200	0.4201	0.42	0.0605	0.0364	0.0489
0.06	0.1700	0.4656	0.4657	0.43	0.0596	0.0347	0.0494
0.07	0.1598	0.4753	0.4754	0.44	0.0587	0.0332	0.0504
0.08	0.1509	0.4598	0.4599	0.45	0.0579	0.0318	0.0522
0.09	0.1430	0.4300	0.4301	0.46	0.0571	0.0304	0.0548
0.10	0.1361	0.3941	0.3943	0.47	0.0564	0.0292	0.0586
0.11	0.1298	0.3572	0.3574	0.48	0.0556	0.0280	0.0637
0.12	0.1242	0.3220	0.3222	0.49	0.0549	0.0269	0.0707
0.13	0.1192	0.2897	0.2900	0.50	0.0542	0.0259	0.0801
0.14	0.1146	0.2608	0.2611	0.51	0.0536	0.0249	0.0923
0.15	0.1105	0.2351	0.2355	0.52	0.0529	0.0239	0.1077
0.16	0.1067	0.2124	0.2129	0.53	0.0523	0.0231	0.1260
0.17	0.1032	0.1925	0.1931	0.54	0.0517	0.0222	0.1455
0.18	0.0999	0.1750	0.1756	0.55	0.0511	0.0214	0.1621
0.19	0.0969	0.1596	0.1603	0.56	0.0505	0.0207	0.1707
0.20	0.0942	0.1460	0.1468	0.57	0.0499	0.0200	0.1680
0.21	0.0916	0.1340	0.1349	0.58	0.0494	0.0193	0.1554
0.22	0.0891	0.1233	0.1243	0.59	0.0489	0.0187	0.1375
0.23	0.0869	0.1138	0.1150	0.60	0.0483	0.0181	0.1187
0.24	0.0847	0.1053	0.1066	0.61	0.0478	0.0175	0.1015
0.25	0.0827	0.0977	0.0992	0.62	0.0474	0.0169	0.0870
0.26	0.0809	0.0909	0.0925	0.63	0.0469	0.0164	0.0751
0.27	0.0791	0.0847	0.0865	0.64	0.0464	0.0159	0.0654
0.28	0.0774	0.0791	0.0812	0.65	0.0460	0.0154	0.0576
0.29	0.0758	0.0741	0.0764	0.66	0.0455	0.0150	0.0512
0.30	0.0742	0.0695	0.0721	0.67	0.0451	0.0145	0.0460
0.31	0.0728	0.0653	0.0682	0.68	0.0447	0.0141	0.0416

0.32	0.0714	0.0614	0.0648	0.69	0.0442	0.0137	0.0380
0.33	0.0701	0.0579	0.0617	0.70	0.0438	0.0133	0.0349
0.34	0.0688	0.0547	0.0590	0.71	0.0434	0.0129	0.0323
0.35	0.0676	0.0518	0.0565	0.72	0.0431	0.0126	0.0300
0.36	0.0665	0.0490	0.0545	0.73	0.0427	0.0122	0.0280

	MDOC	C. ITAL.	
$n_{1x}$	$S_L$	$S_T$ D/B<3	$S_T$ D/B>3
0.74	0.0423	0.0119	0.0263
0.75	0.0419	0.0116	0.0247
0.76	0.0416	0.0113	0.0233
0.77	0.0412	0.0110	0.0221
0.78	0.0409	0.0107	0.0210
0.79	0.0406	0.0105	0.0200
0.80	0.0402	0.0102	0.0191
0.81	0.0399	0.0100	0.0183
0.82	0.0396	0.0097	0.0175
0.83	0.0393	0.0095	0.0168
0.84	0.0390	0.0093	0.0161
0.85	0.0387	0.0091	0.0155
0.86	0.0384	0.0088	0.0150
0.87	0.0381	0.0086	0.0144
0.88	0.0379	0.0085	0.0139
0.89	0.0376	0.0083	0.0135
0.90	0.0373	0.0081	0.0130
0.91	0.0370	0.0079	0.0126
0.92	0.0368	0.0077	0.0122
0.93	0.0365	0.0076	0.0119
0.94	0.0363	0.0074	0.0115
0.95	0.0360	0.0073	0.0112
0.96	0.0358	0.0071	0.0109
0.97	0.0356	0.0070	0.0106
0.98	0.0353	0.0068	0.0103
0.99	0.0351	0.0067	0.0100
1.00	0.0349	0.0066	0.0098

Graficando los valores anteriores se puede apreciar de mejor manera el comportamiento dado en ambos procedimientos:



**Figura 3.4.1.1** Comparativa de las Funciones de Densidad Espectral del código italiano y el MDOC.

Se puede observar que mientras, en escala logarítmica el comportamiento del MDOC es lineal, lo que indica que se está considerando solo la energía de turbulencia, por lo que estaría relacionada al sentido longitudinal, el comportamiento que se obtiene con el procedimiento dado por el código italiano para el caso donde  $D/B < 3$  presenta una gran energía alrededor de cierta frecuencia, lo que es consistente con el comportamiento dado por el desprendimiento de vórtices en edificios altos, en cambio para el caso donde  $D/B > 3$  se tienen dos picos de energía, el primero en la misma frecuencia donde se presenta para el caso de  $D/B < 3$  y otro en una frecuencia más alta, esto nos indica que esta función de densidad espectral está calibrada para el sentido transversal en el edificio con respecto a la dirección del viento.



## CAPÍTULO 5

### PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL FACTOR DE ACELERACIÓN TRANSVERSAL ( $F_{aT}$ )

#### 5.1 MÉTODO NUMÉRICO

Una vez que se ha obtenido la ecuación final para la obtención de la probabilidad final de percepción se realiza el procedimiento siguiente para realizar el análisis de calibración del factor de aceleración transversal,  $F_{aT}$ , y así obtener curvas de sensibilidad correspondientes a distintas frecuencias que permitirán la obtención de una ecuación general para el cálculo de los factores de aceleración. Para ello se comienza con el estudio paramétrico por medio del método numérico de bisección:

##### 5.1.1 MÉTODO DE BISECCIÓN

El método de bisección, también conocido como de corte binario, de partición de intervalos o de Bolzano, es un tipo de búsqueda incremental en el que el intervalo se divide siempre a la mitad (Chapra Steven C. (2007) “MÉTODOS NUMÉRICOS PARA INGENIEROS”). Se aplica a funciones algebraicas o trascendentes y proporciona únicamente raíces reales. Si la función cambia de signo dentro de un intervalo, se evalúa dicha función en el punto medio. La posición de la raíz se determina situándola en el punto medio del subintervalo, dentro del cual ocurre un cambio de signo. Este proceso se repite hasta obtener una mejor aproximación.

Los pasos de este método se explican a continuación:

*Paso 1: Elija valores iniciales inferior,  $x_l$ , y superior,  $x_u$ , que encierren la raíz, de forma tal que la función cambie de signo dentro de dicho intervalo. Esto se verifica comprobando que  $f(x_l)f(x_u) < 0$ .*

*Paso 2: Una aproximación de la raíz  $x_r$  se determina mediante:*

$$x_r = \frac{x_l + x_u}{2}$$

*Paso 3: Realice las siguientes evaluaciones para determinar en qué subintervalo está la raíz:*

- a) *Si  $f(x_l)f(x_u) < 0$ , entonces la raíz se encuentra dentro del subintervalo inferior o izquierdo. Por lo tanto, haga  $x_u = x_r$  y vuelva al paso 2.*
- b) *Si  $f(x_l)f(x_u) > 0$ , entonces la raíz se encuentra dentro del subintervalo superior o derecho. Por lo tanto, haga  $x_l = x_r$  y vuelva al paso 2.*
- c) *Si  $f(x_l)f(x_u) = 0$ , entonces la raíz es igual a  $x_r$ ; termina el cálculo.*

## 5.2 SIMULACIÓN DE LAS ECUACIONES

Establecido el método numérico a utilizar para la búsqueda de la de probabilidad incondicional de percepción se procede a realizar la simulación de la ecuación 4.11, por medio del programa MATLAB en su versión R2021b.

Para el análisis paramétrico realizado en la presente investigación se utilizó un intervalo de  $1 \times 10^{-10}$  mili-g como límite inferior y 50 mili-g como límite superior, con lo cual se consideró que se tendría una precisión más que suficiente para el objetivo buscado. De la misma manera se realizó la simulación de 10,000 valores aleatorios para el cálculo de las variables aleatorias establecidas dentro de la ecuación 4.11, de tal manera que se tuviera la cantidad de simulaciones suficientes para que los resultados fueran aceptables y suficientemente significativos.

De la misma manera se establecieron como objetivo la búsqueda de probabilidades de falla objetivo de 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9; así como las frecuencias 0.1 - 1.0 Hz, con intervalos de 0.1 Hz.

También se establecieron las siguientes condiciones para el edificio sobre el cual se realizarán las simulaciones;

$$B = 30 \text{ m};$$

$$V_{T0} = 25 \text{ m/s (velocidad asociada a un periodo de retorno de 10 años)}$$

$$D = 30 \text{ y } 300 \text{ m (para la condición de } D/B < 3 \text{ o } D/B \geq 3);$$

$$\zeta = 0.01 \text{ (relación de amortiguamiento estructural)}$$

H = La altura se hizo variar en 50 y 200 metros, con la finalidad de revisar el cómo afecta dicha condición a los resultados obtenidos, esto en el análisis de sensibilidad realizado posteriormente.

---

### 5.2.1 SELECCIÓN DEL INTERVALO DE COEFICIENTES DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD

Con el fin de obtener la envolvente que tome en cuenta todos los valores de los coeficientes de variación de la velocidad del viento para las condiciones presentes en la Ciudad de México se obtuvieron los valores de la distribución de Gumbell U y  $\alpha$  de las diversas colonias que conforman la ciudad, para obtener los parámetros de dicha distribución con base en estos valores se emplearon las ecuaciones siguientes:

$$\sigma = \frac{\pi}{(\sqrt{6}\alpha)}$$
$$M = u + \left(\frac{0.577}{\alpha}\right)$$

y el coeficiente de variación:

$$C_{ov} = \sigma/M$$

Con estos valores se obtuvo el valor mínimo de 0.12 y el máximo de 0.17 por lo que se tomó la decisión de usar valores de coeficiente de variación de 0.10 a 0.25 con 50 valores intermedios para que los cálculos realizados tuvieran la separación adecuada y abarcaran la mayor cantidad de posibles variaciones que pudieran surgir durante estos.

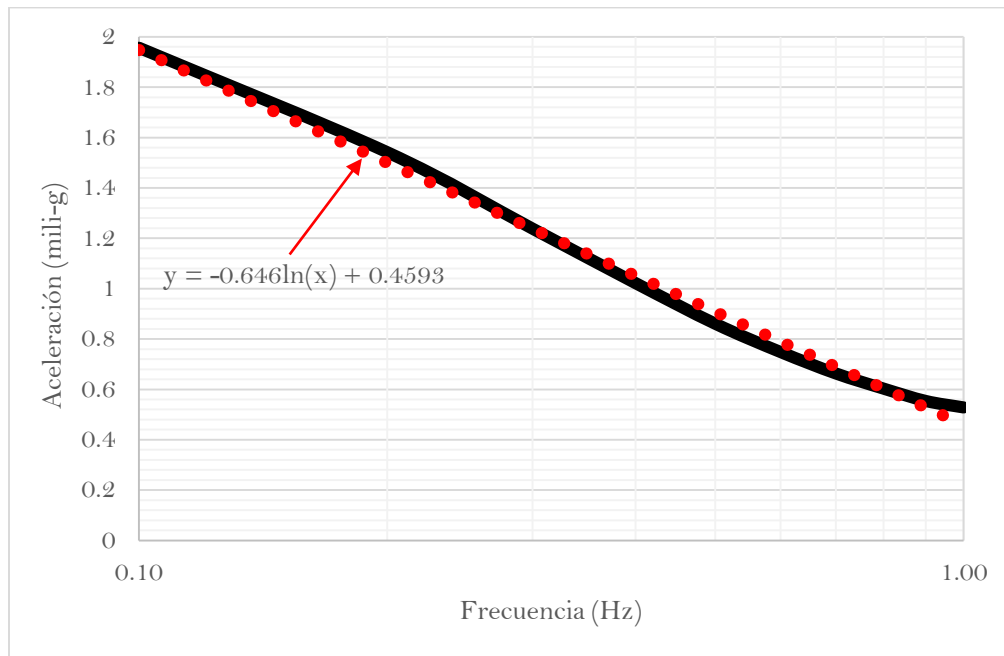
### 5.2.2 RESULTADOS PARA D/B < 3

Con base en el procedimiento descrito en secciones anteriores y empleando coeficientes de variación de la velocidad de 0.10 y la probabilidad de falla de 0.10 y para ejemplificar el procedimiento global, se obtuvieron en primera instancia las aceleraciones mostradas en la Tabla 5.2.2.1.

**Tabla 5.2.2.1.** Aceleraciones para distintas frecuencias con un coeficiente de variación de la velocidad de 0.10 y  $P_{fp}$  de 0.10

$f_n$ (Hz)	Aceleración (mili-g)
0.10	1.9564
0.20	1.5417
0.30	1.2384
0.40	1.0220
0.50	0.8603
0.60	0.7480
0.70	0.6630
0.80	0.6027
0.90	0.5536
1.00	0.5280

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 5.2.2.1, se obtiene la Fig. 5.2.2.1, que relaciona la frecuencia con el valor de la aceleración en mili-g, en donde se establece la línea de tendencia logarítmica y también la ecuación que describe la pendiente de dicha línea:



**Fig 5.2.2.1.** Gráfica de frecuencia – valor de la aceleración en mili-g para una  $P_{fp}$  de 0.10 y un coeficiente de variación de la velocidad de 0.10.

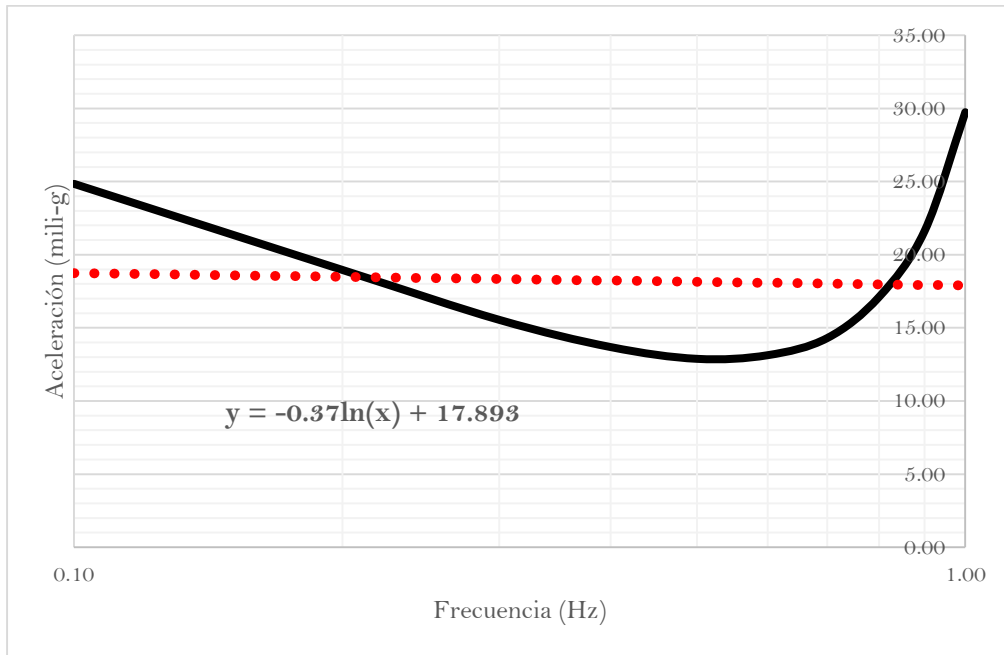
Sin embargo, esto no es del todo correcto para los valores más altos de probabilidad de percepción, en donde se empieza a tener mayor dispersión de los resultados, por lo que se hace

necesario el realizar un ajuste de dichos datos y obtener una nueva línea de tendencia, así como una nueva ecuación que la describa, para ello se toman los valores hasta frecuencias de 0.7 Hz para el caso de la probabilidad incondicional de percepción de 0.5 y 0.7 y de hasta 0.5 Hz para el caso de la probabilidad de 0.9, ya que los valores posteriores presentan mayor dispersión, como ya se ha mencionado, con esto se obtuvo su línea de tendencia logarítmica y, de la misma manera, la ecuación de la pendiente de esta.

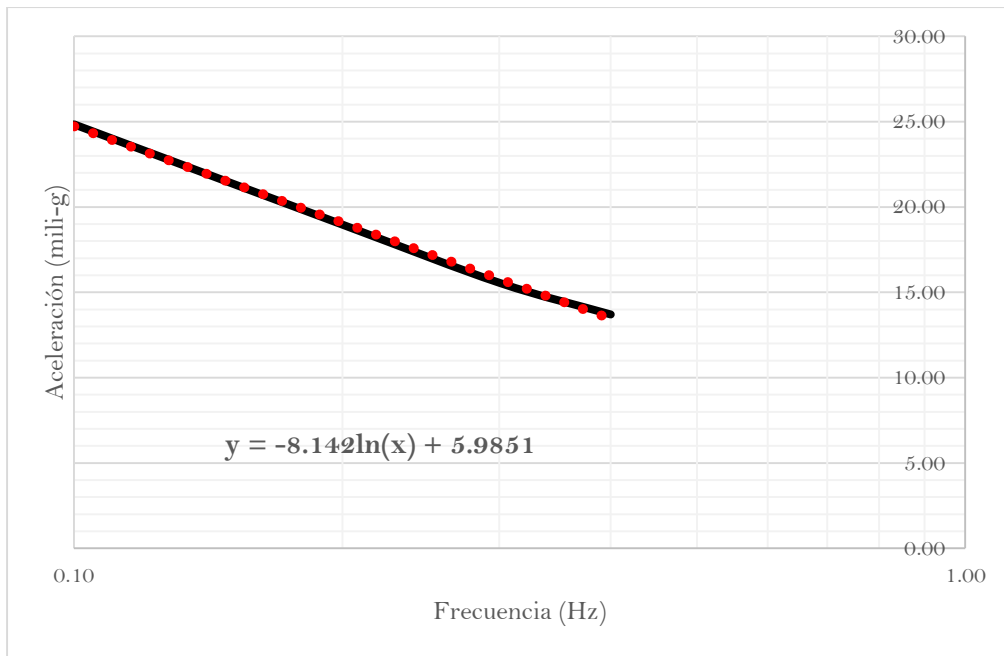
En la Tabla 5.2.2.2 y las figuras 5.2.2.3 y 5.2.2.4, se presenta un ejemplo de lo mencionado en el párrafo anterior:

**Tabla 5.2.2.2.** Aceleraciones para distintas frecuencias con un coeficiente de variación de la velocidad de 0.20,  $P_{ip}$  de 0.90 y altura, H, de 200 metros

$f_n$ (Hz)	Aceleración (mili-g)
0.10	24.844
0.20	18.9649
0.30	15.5524
0.40	13.6945
0.50	12.8903
0.60	13.1383
0.70	14.31
0.80	17.1098
0.90	21.6152
1.00	29.7404



**Fig 5.2.2.2.** Gráfica de frecuencia – valor de la aceleración en mili-g para una  $P_{fp}$  de 0.90 y un coeficiente de variación de la velocidad de 0.20 y una altura,  $H$ , de 200 m, sin ajustar.

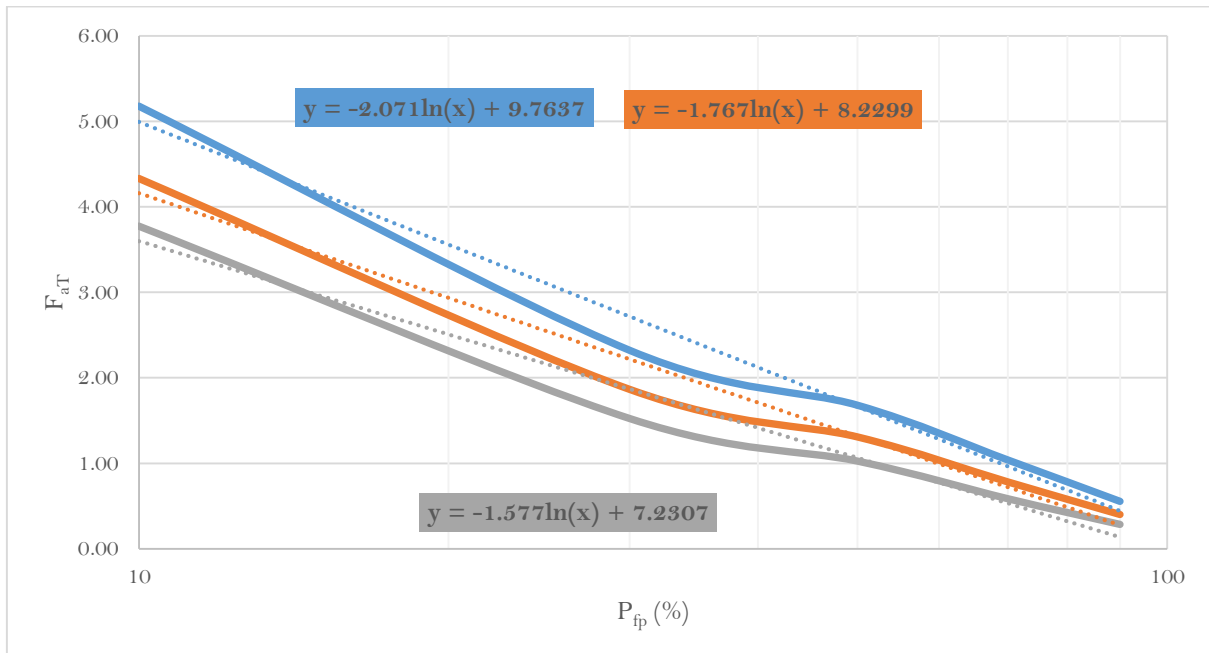


**Fig 5.2.2.3.** Gráfica de frecuencia – valor de la aceleración en mili-g para una  $P_{fp}$  de 0.90 y un coeficiente de variación de la velocidad de 0.20 y una altura,  $H$ , de 200 m, ajustada.

Como se puede observar en la Tabla 5.2.2.2 y la Fig. 5.2.2.3 los datos a partir de una frecuencia,  $f_n$ , de 0.5 empiezan a volverse mas dispersos provocando que la linea de tendencia logaritmica no se ajusta a estos resultados, por ello, en la Fig. 5.2.2.4 solo se tomaron en cuenta los valores de aceleración hasta una frecuencia de 0.5 Hz, con ello la linea de tendencia logaritmica se ajusta de buena manera a estos resultados, con esta se obtuvo la ecuación mostrada dentro de la Fig. 5.2.2.4 y, que se utiliza para realizar el ajuste de las aceleraciones.

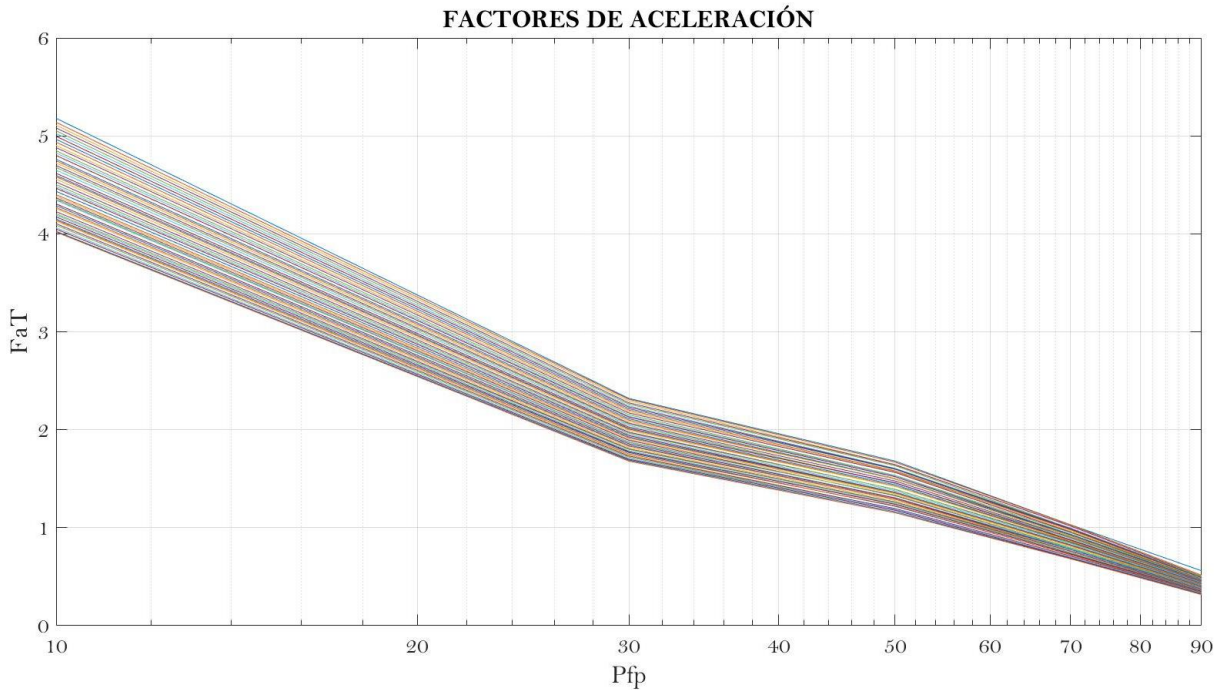
### 5.2.2.1 FACTORES DE ACELERACIÓN TRANSVERSAL

Haciendo uso de los valores de aceleraciones pico con periodo de retorno de 10 años hallados en el AIJ (2004) se promedian todas las frecuencias para cada probabilidad objetivo para obtener los valores de los factores de aceleración transversal,  $F_{aT}$ , de los cuales se debe obtener el valor de la pendiente, que se toma como  $a$ , así como de la ordenada al origen, que será el valor tomado como  $b$ , tal y como se muestra en la Fig. 5.2.2.1.1:



**Figura 5.2.2.1.1.** Factores de aceleración para los distintos  $P_{fp}$ .

Al realizar este mismo procedimiento para todos los valores de coeficiente de variación considerados (0.10 a 0.25 con 50 intervalos), se obtienen las gráficas de la Fig. 5.2.2.1.2:



**Figura 5.2.2.1.2.** Variación del factor de aceleración transversal con respecto al  $P_{fp}$ , para valores de coeficiente de variación de velocidad de 0.10 a 0.25.

Se observa de la Fig. 5.2.2.1.2 que los valores de los factores de aceleración transversal varían desde 4.0~5.2 para 10% de  $P_{fp}$  y de hasta 0.3~0.6 para el 90 % de  $P_{fp}$  dependiendo del coeficiente de variación de velocidad considerado, siendo una reducción bastante considerable en los factores de aceleración, también se puede notar que esta reducción tiene un comportamiento que se asemeja a una línea logarítmica con una pendiente lineal, lo que nos indica que los valores de los  $F_{aT}$ , tienen poca dispersión, por lo que de estas líneas se pueden calcular los factores de aceleración transversal ajustados, esto se logra trazando la línea de tendencia de cada curva y formulando la ecuación de la pendiente que asemejará de forma bastante aceptable los valores de los  $F_{aT}$ .

### 5.2.3 AJUSTE DE LOS VALORES DE LOS FACTORES DE ACELERACIÓN TRANSVERSAL

Los factores de aceleración están en función de la probabilidad de percepción al movimiento ( $P_{fp}$ ) y del coeficiente de variación de la velocidad ( $\delta_v$ ). Como se muestra en la figura 5.2.2.2 se puede verificar que las líneas de tendencia de cada curva de los factores de aceleración obtenidos anteriormente, pueden ser ajustados a una ecuación logarítmica que calcula de forma aproximada



estos valores, de modo que se puede proponer una función lineal del logaritmo del  $P_{fp}$ , la cual puede expresarse de la siguiente forma funcional:

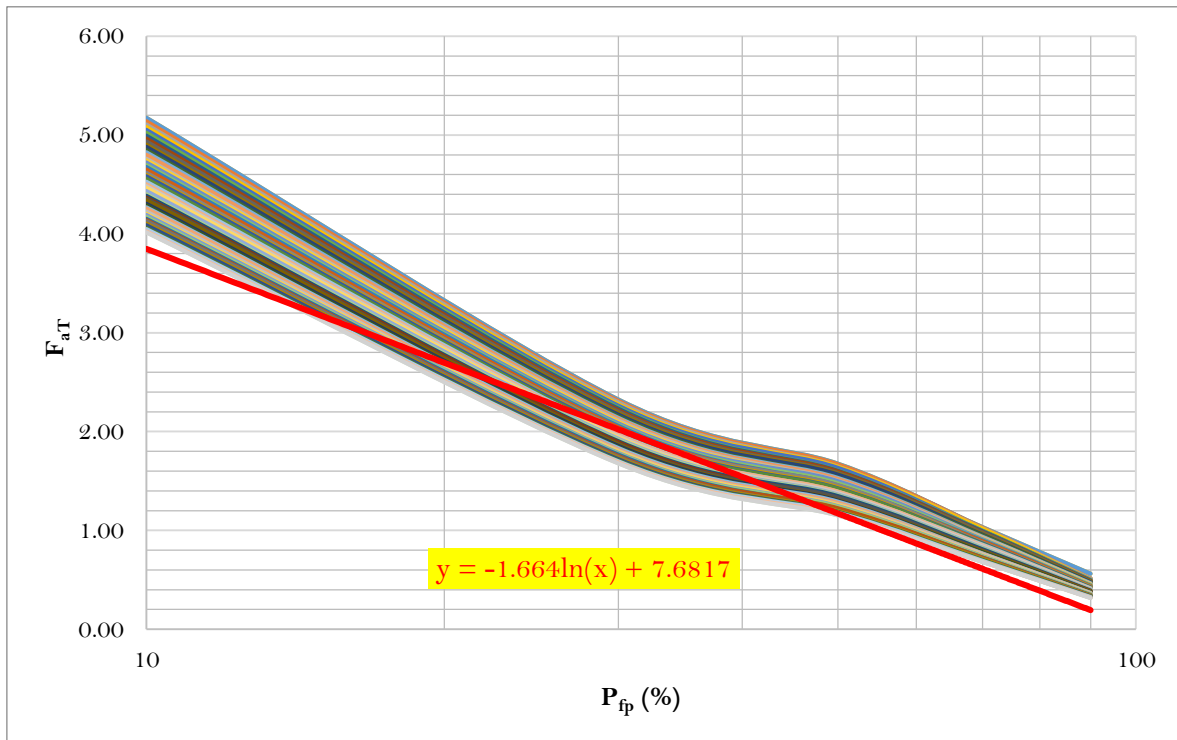
$$F_{aT} = \alpha \ln(P_{fp}) + \beta \quad \text{Ec. 5.2.3.1}$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros del modelo que dependen del coeficiente de variación de la velocidad ( $\delta_v$ ). Usando el método de mínimos cuadrados, el error ( $\epsilon$ ) se define como:

$$\epsilon = \sum (F_{aT}(P_{fp}|\theta) - F_{aTi})^2$$

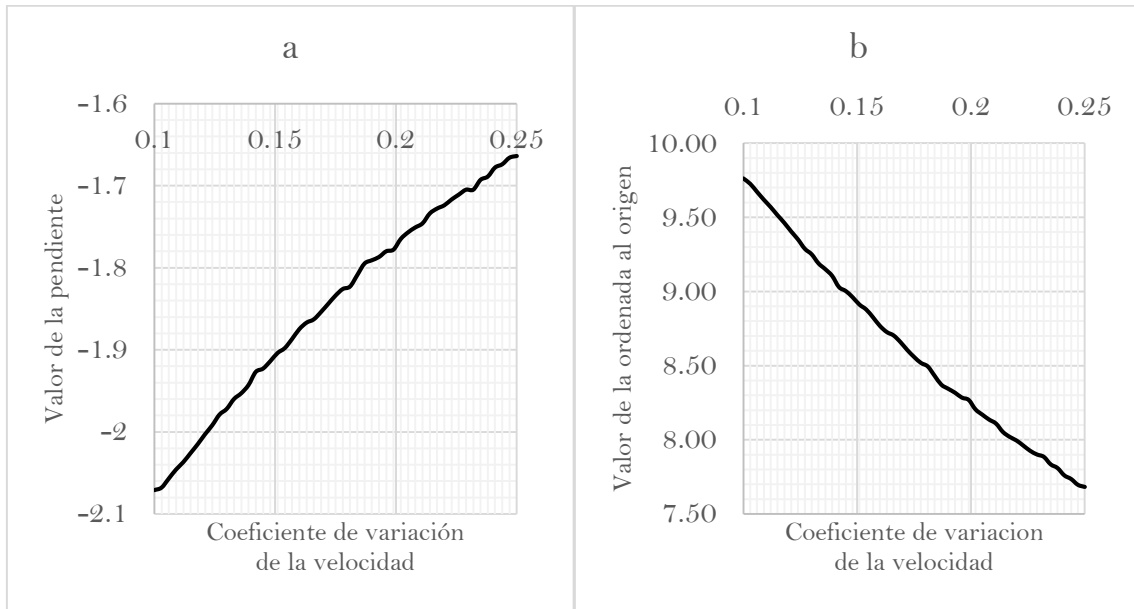
donde  $F_{aT}(P_{fp} | \theta)$  es el valor predictivo de  $F_{aT}$  usado en la ec. 5.2.3.1 y  $F_{aTi}$  representa los valores de la muestra.

Una vez que se obtienen los valores de  $F_{aT}$  se procede a realizar el ajuste de cada una de las curvas obtenidas, en este caso se realizó con la línea de tendencia logarítmica para obtener los valores de  $a$ , que es la pendiente, y de  $b$ , que es la ordenada al origen; se realizó de esta manera porque el valor del error total acumulado era menor a 4:



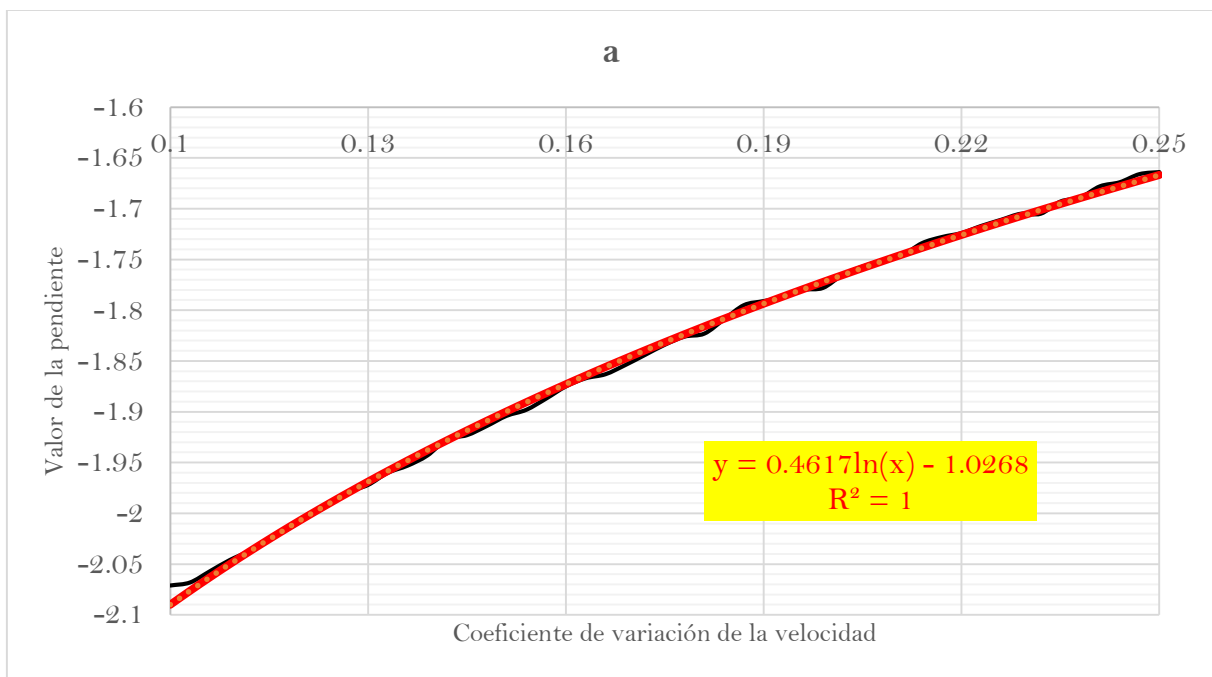
**Figura 5.2.3.1.** Línea de tendencia para ajustar las curvas de los factores de aceleración transversal.

Realizando este procedimiento para cada una de las curvas de estos factores se obtienen los valores de  $a$  y de  $b$ , a partir de los cuales se pueden obtener las gráficas de la Fig. 5.2.3.2.

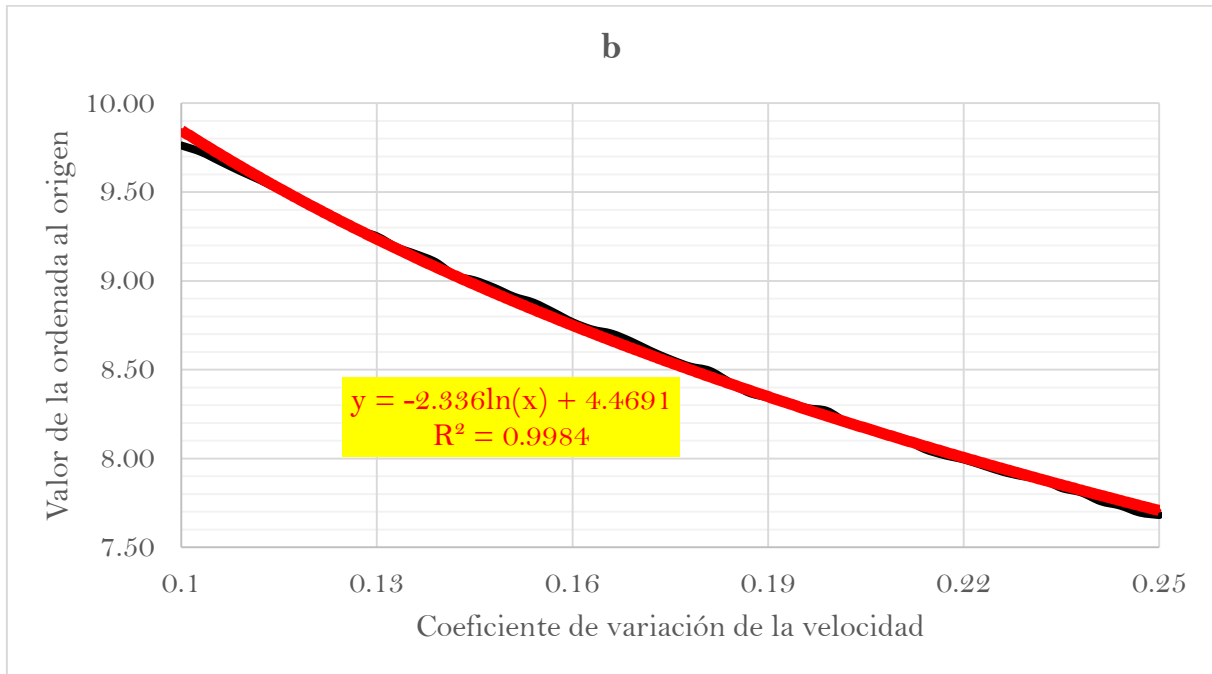


**Figura 5.2.3.2.** Comportamiento de los valores de la pendiente, *a*, y de la ordenada al origen, *b*.

El comportamiento que se obtuvo de estos valores bastante regular, sin grandes variaciones, por lo que se propuso realizar el ajuste de estos a partir de una línea de tendencia logarítmica y de la ecuación de dicha línea, como se muestra en las figuras siguientes:



**Figura 5.2.3.3.** Ajuste de la curva de la pendiente, *a*.



**Figura 5.2.3.4.** Ajuste de la curva de la pendiente, b.

Las líneas de tendencia obtenidas, así como las ecuaciones de esta línea, para ambos casos, se ajustan bastante bien a los valores originales, esto se puede ver en el valor del coeficiente de determinación que prácticamente tiene el valor de la unidad en ambas gráficas. De modo que se formulan las ecuaciones siguientes:

$$\alpha = a_1 \ln(\delta_v) + a_2 \quad \text{para } 0.1 \leq \delta_v \leq 0.25 \quad \text{Ec. 5.2.3.2}$$

$$\beta = b_1 \ln(\delta_v) + b_2 \quad \text{para } 0.1 \leq \delta_v \leq 0.25 \quad \text{Ec. 5.2.3.3}$$

Los parámetros de las Ecs 5.2.3.2 y 5.2.3.3 se presentan en la Tabla 5.2.3.1.

**Tabla 5.2.3.1.** Parámetros de las ecuaciones 5.2.4.1 y 5.2.4.2

Parámetro Ec. 5.2.3.2	Valor	Parámetro Ec. 5.2.3.3	Valor
a <sub>1</sub>	0.4617	b <sub>1</sub>	-2.336
a <sub>2</sub>	-1.0268	b <sub>2</sub>	4.4691

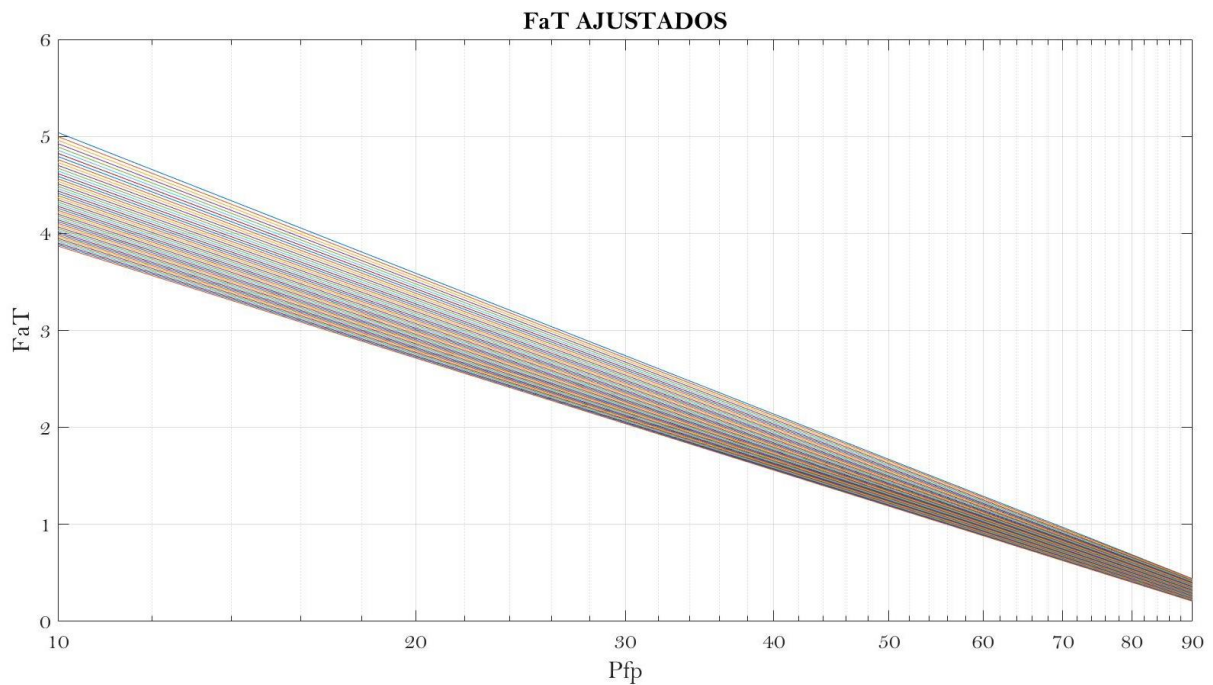
A partir de los valores encontrados para los parámetros de las ecuaciones de  $\alpha$  y  $\beta$ , se sustituye en la ecuación 5.2.3.1 para encontrar la ecuación final para calcular los factores de aceleración ajustados.

$$F_{aT} = [a_1 \ln(\delta_v) + a_2] \ln(P_{fp}) + [b_1 \ln(\delta_v) + b_2]$$

$$F_{aT} = [(0.4617) \ln(\delta_v) + (-1.0268)] \ln(P_{fp}) + [(-2.336) \ln(\delta_v) + (4.4691)]$$

$$F_{aT} = [0.4617 \ln(\delta_v) - 1.0268] \ln(P_{fp}) + [-2.336 \ln(\delta_v) + 4.4691] \quad \text{Ec. 5.2.3.4}$$

A partir de la ecuación 5.2.3.4 y variando los valores de coeficiente de variación de la velocidad,  $\delta_v$ , y la probabilidad de percepción del movimiento,  $P_{fp}$ , se obtienen las curvas de los factores de aceleración transversal ya ajustados con la ecuación encontrada, que gráficamente lucen como se muestra en la Fig. 5.2.3.5.



**Figura 5.2.3.5.** Factores de aceleración transversal,  $F_{aT}$ , ajustados.

Como se puede notar los valores extremos de los factores de aceleración transversal no varían al ajustarlos si se les compara con los valores sin ajustar, en cuanto a los valores intermedios se ajustan de forma aceptable a lo que se calculó inicialmente y que fue graficado en la figura 5.2.2.3, por lo que se demuestra que la ecuación 5.2.3.4 calcula de forma aceptable los valores de los factores de aceleración con base en el coeficiente de variación de la velocidad,  $\delta_v$ , y la probabilidad de percepción del movimiento,  $P_{fp}$ , de modo que se aceptan los valores de los  $F_{aT}$  calculados con esta ecuación y que servirán para factorizar los valores de aceleración que se encuentren con la

metodología del código italiano seleccionada anteriormente, ya con esto se habrán adaptado los resultados de aceleración a las condiciones imperantes de la Ciudad de México.

Sin embargo, aún falta el verificar que otras variables no afecten de forma significativa los resultados finales, para ello deben verificarse estas variables de interés por medio de un análisis de sensibilidad de los resultados, lo que se realiza en el apartado siguiente.

### 5.3 VERIFICACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS

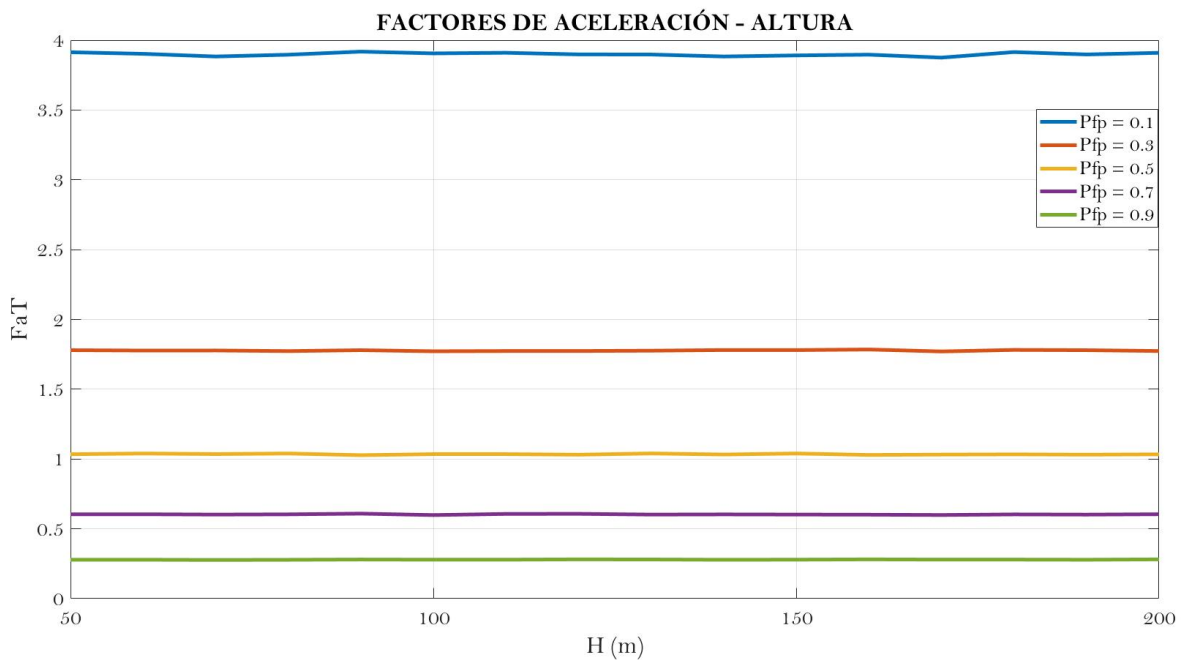
#### 5.3.1 VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL EDIFICIO Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Como se mencionó anteriormente, para verificar la sensibilidad de los resultados obtenidos ante las variaciones de la altura y la velocidad del viento, se realiza la siguiente prueba con un edificio con los siguientes datos:

Datos fijos:

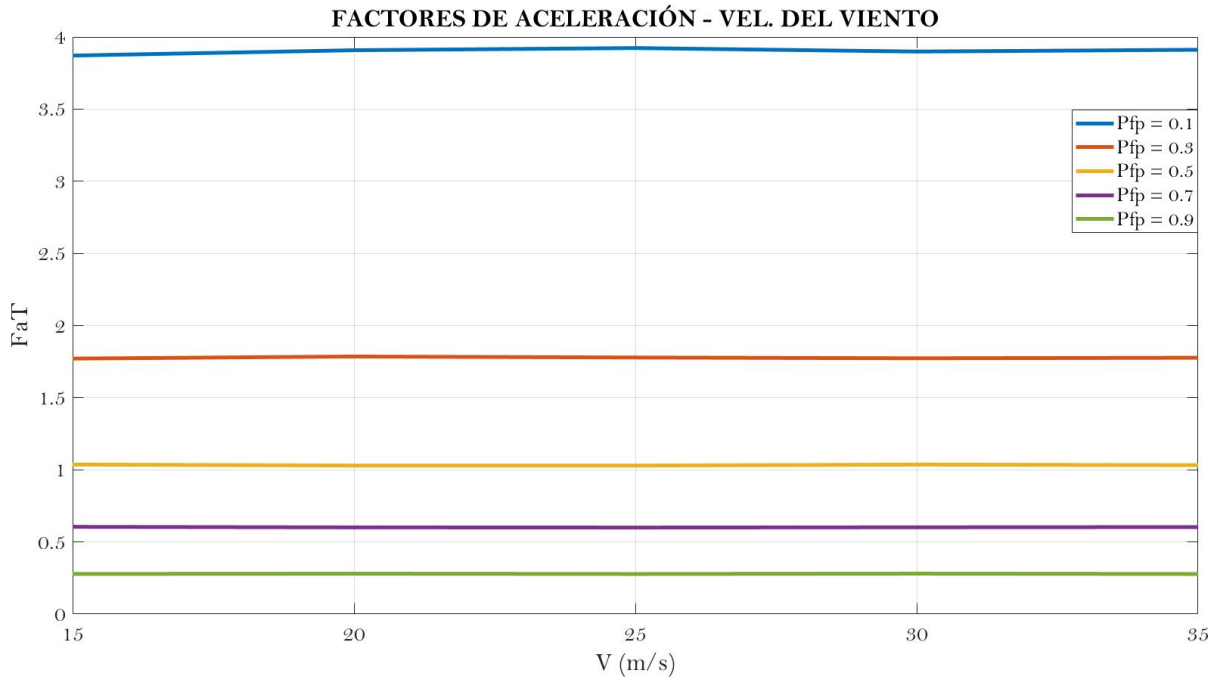
$$\begin{array}{lll} B = 40 \text{ m} & V_T = 25 \text{ m/s} & Cov(V) = 0.25 \\ D = 40 \text{ m} & f_n = 0.5 \text{ Hz} & \end{array}$$

Al variar la altura desde 50 hasta 200 metros para cada probabilidad objetivo se obtienen los valores que se presentan en la siguiente Figura:



**Figura 5.3.1.** Análisis de sensibilidad de los resultados a la variación de la altura.

Para el caso de la verificación de la sensibilidad de los resultados a la velocidad del viento se fijó una altura,  $H$ , de 50 metros y se hace variar la velocidad del viento en un intervalo de los 15 – 35 m/s, como se muestra en la Fig. 5.2.2.



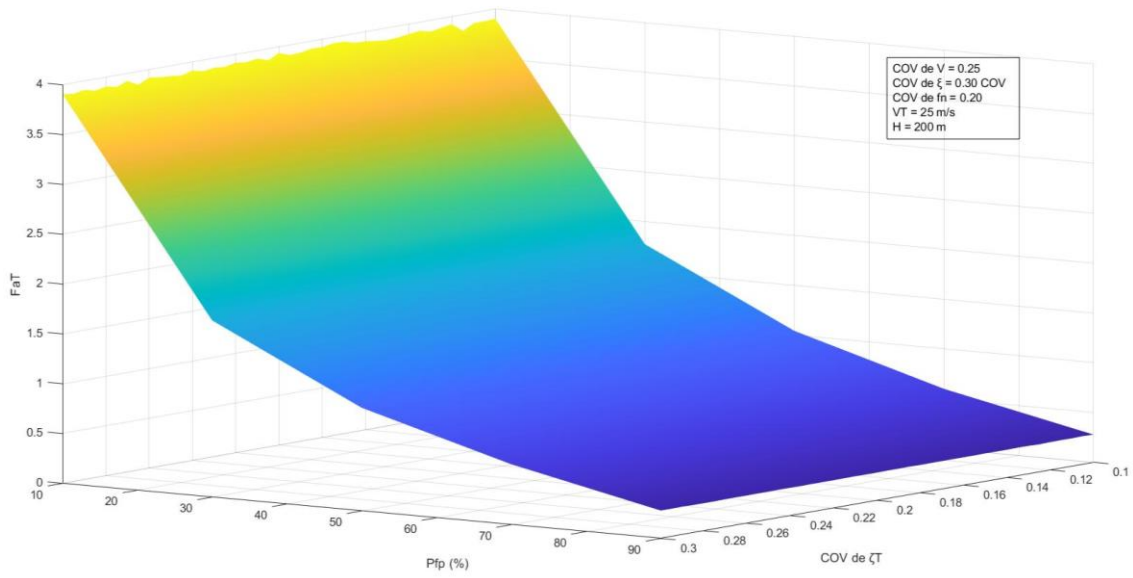
**Figura 5.3.2.** Análisis de sensibilidad de los resultados a la variación de la velocidad del viento.

En las gráficas 5.3.1 y 5.3.2 se puede apreciar que los valores obtenidos para los factores de aceleración no varían significativamente ni con la altura ni con el cambio en la velocidad del viento y que, las ligeras variaciones existentes se deben al uso de valores aleatorios para el cálculo de las variables aleatorias dentro de la misma ecuación por lo que se concluye que estas variables no influyen de forma significativa en los resultados obtenidos de aceleración transversal.

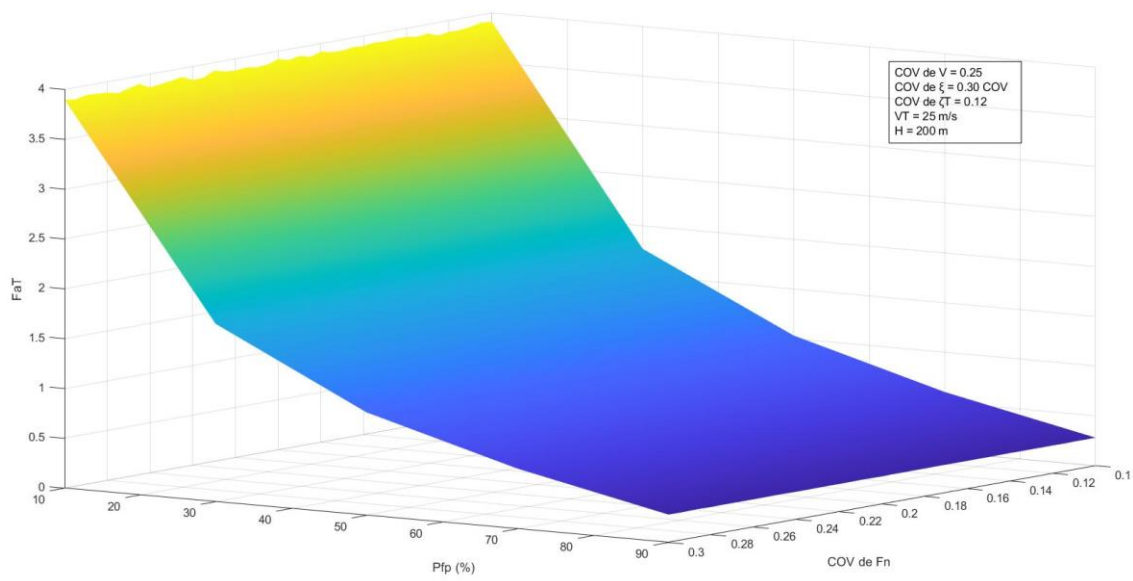
### 5.3.2 IMPACTO DE LOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN DE $\zeta_T$ , $\tilde{f}_n$ Y $\tilde{\xi}$ EN LOS FACTORES DE ACELERACIÓN

De la misma manera, se verifican los resultados obtenidos de los factores de aceleración transversal con diferentes valores de los coeficientes de variación de la frecuencia, amortiguamiento y del factor  $\zeta_T$  (que se definió anteriormente) con un intervalo de valores de 0.10 – 0.25 con intervalos de 0.003 de modo que se tengan 50 valores, se fijó una altura de 200 metros y una velocidad de 25

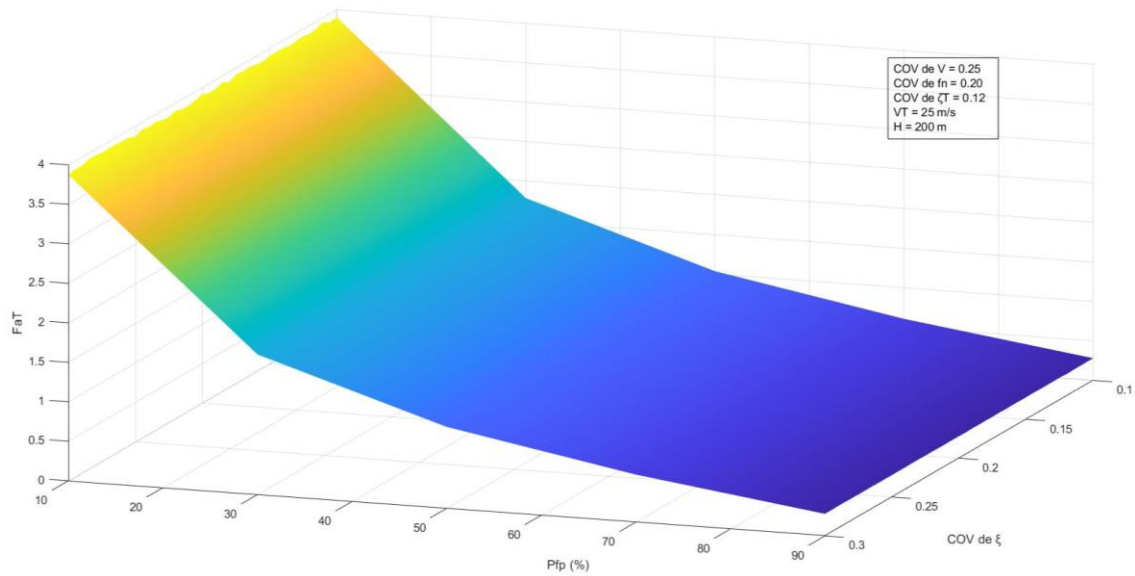
m/s, los valores que toman los demás coeficientes de variación que se fijan en cada análisis de sensibilidad se presentan en la Fig. 5.3.3.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.3.3.** Variación del  $F_{aT}$  con respecto al  $P_{fp}$  para diferentes valores del coeficiente de variación (a) Coeficiente de variación de  $\zeta_T$ , (b) Coeficiente de variación de  $F_n$  y (c) Coeficiente de variación de  $\xi$ .

Como se puede notar, los resultados obtenidos aun con los diferentes cambios en los coeficientes de variación de las variables de frecuencia, amortiguamiento y de la variable  $\zeta_T$ , no hacen variar de forma significativa a éstos, se mantienen prácticamente en los mismos valores para los tres coeficientes verificados, por lo mismo, se determina que estos no afectan el resultado final obtenido de los factores de aceleración y se considera a dichos factores como independientes a estos coeficientes.



### 5.3.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN ( $F_{aT}$ )

Una vez definida la ecuación para calcular los factores de aceleración transversal,  $F_{aT}$ , y al haber analizado la sensibilidad de los resultados obtenidos de las variables que se consideraron de interés para el cálculo de dichos factores de aceleración; se presenta un ejemplo de aplicación de dicho procedimiento, en el que se calculará la aceleración transversal por medio de la metodología propuesta, se calcularán los factores de aceleración para las probabilidades incondicionales de percepción de la aceleración que interesen, se factorizará la aceleración calculada por medio de estos factores de aceleración y se comparará con los valores límite dados por la curva H50 del AIJ de modo que pueda determinarse si dicha edificación tiene un diseño aceptable dependiendo del nivel de  $P_{fP}$  buscado o si es necesario realizar una modificación al diseño propuesto para cumplir cabalmente con esta condición de servicio, para ello se propone un edificio con las características mostradas en la Tabla 5.3.3.1.:

**Tabla 5.3.3.1** Datos del edificio ejemplo.

Diseño estructural	$B = 40 \text{ m}; D = 40 \text{ m}; Z = 200 \text{ m}; f_n = 1.0 \text{ Hertz}; m = 36 \times 10^6 \text{ kg};$ $\xi = 0.01$
Información dinámica	$\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3; V_b = 25 \text{ m/s}; C_t = 1.0; \text{Terreno rugoso}$
Parámetros para calcular $\hat{x}$	$g_T = 3.738; C_T = 0.157; R_T = 0.398; \sigma_{aT} = 0.012$

Empleando la ecuación 3.1.3.18 se obtiene una aceleración transversal, igual a  $a_{pT}$  de  $0.045 \text{ m/s}^2$  (4.561 mili-g). Acorde al procedimiento que se ha propuesto se debe multiplicar esta aceleración por el factor de aceleración transversal,  $F_{aT}$ , correspondiente a la probabilidad de percepción del movimiento,  $P_{fp}$ , y el coeficiente de variación de velocidad,  $\delta_v$ , deseados:

Los valores de los factores de aceleración se obtienen a partir de la ecuación 5.2.3.4 y de los valores de la Tabla 5.3.3.1. se obtienen los valores de la Tabla 5.3.3.2.:

**Tabla 5.3.3.2.** Resultados de los factores de aceleración transversal con  $\delta_v$  de 0.1 a 0.25.

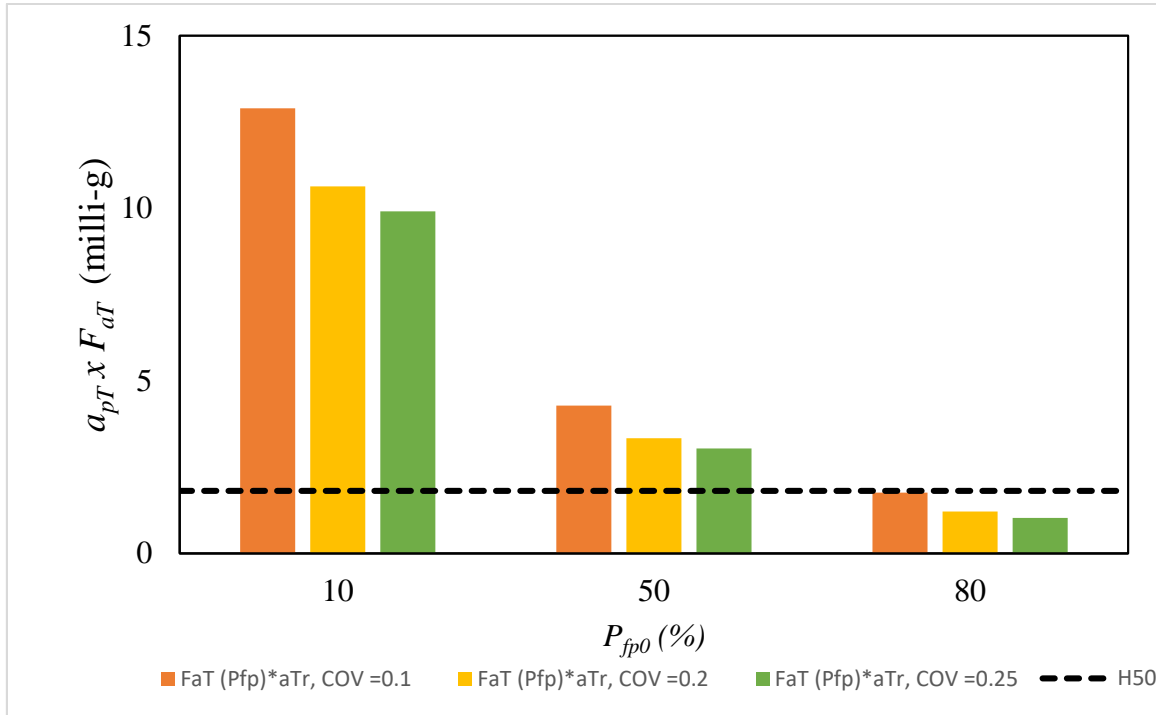
<b>COV</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.25</b>
<b>P<sub>fpo</sub></b>	<b>F<sub>aT</sub></b>		
10	5.036	4.153	3.869
20	3.587	2.927	2.714
30	2.740	2.209	2.038
40	2.139	1.700	1.559
50	1.672	1.305	1.187
60	1.291	0.982	0.883
70	0.969	0.709	0.626
80	0.690	0.473	0.403
90	0.444	0.265	0.207

Los valores de la Tabla 5.3.3.2 se multiplican por el valor de la aceleración transversal obtenido anteriormente; la aceleración factorizada se muestra en la Tabla 5.3.3.3.:

**Tabla 5.3.3.3.** Resultados de F<sub>aT</sub> x a<sub>pT</sub>

<b>COV</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.25</b>
<b>P<sub>fpo</sub></b>	<b>F<sub>aT</sub> x a<sub>pT</sub></b>		
10	12.9	10.6	9.9
20	9.2	7.5	6.9
30	7.0	5.7	5.2
40	5.5	4.4	4.0
50	4.3	3.3	3.0
60	3.3	2.5	2.3
70	2.5	1.8	1.6
80	1.8	1.2	1.0
90	1.1	0.7	0.5

Finalmente, se realiza la comparativa con los valores de percepción de aceleración de la curva H-50 para  $f = 1.0$  Hz, que en este caso resulta igual a 3.02 mili-g. La evaluación de este criterio para los valores considerados de P<sub>f<sub>p</sub></sub> y de  $\delta_v$  con el edificio propuesto se presentan en la Fig. 5.3.3.1.:



**Figura 5.3.3.1.** Comparación de los factores de aceleración del edificio ejemplo y los valores de la curva H-50 para  $f_s = 1.0$  Hz

Se observa en la Fig. 5.3.3.1 que los valores obtenidos de la aceleración factorizada ( $F_{aT} \times a_{pT}$ ) para el edificio ejemplo propuesto es menor o igual a los valores de la línea H50 del AIJ pero solo cuando el valor de la percepción de la aceleración es del 80%, independientemente del valor del coeficiente de velocidad del viento seleccionado, sin embargo, para que los valores de la aceleración factorizada cumplan con esta condición de servicio en porcentajes menores de percepción de la aceleración se requeriría de la aplicación de medidas adicionales en el diseño que permitan disminuir esta aceleración factorizada.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 7.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se plasmó la investigación realizada para solventar la problemática descrita en un inicio y alcanzar el objetivo de establecer un procedimiento para el cálculo de la aceleración transversal en edificios altos, ya que son los más vulnerables a esta problemática, para la Ciudad de México, de modo que se pueda definir si el diseño del edificio cumple con los niveles de percepción de la aceleración buscados; de todo el procedimiento realizado en la investigación se obtuvieron las conclusiones siguientes:

- Los resultados de la aceleración factorizada obtenidos en la metodología seleccionada son invariables a los cambios en las dimensiones de planta (base y profundidad) y altura del edificio, también a la frecuencia de vibración del edificio, a su amortiguamiento y al factor  $\zeta_r$ , que, a su vez, incluye otras variables (densidad del aire, coeficiente de fuerza aerodinámica, etc.), las mínimas variaciones que se presentaron en los resultados son debidas al uso de valores aleatorios durante el cálculo.
  - Como se puede notar en el presente trabajo, todas las metodologías recabadas y evaluadas tienen la limitación de que la altura del edificio no debe superar los 200 metros de altura, de la misma manera que lo especifican las NTC de diseño por viento y el MDOC para el sentido longitudinal debido a los efectos aeroelásticos, en cuyo caso se deben revisar las condiciones de sitio como dirección del viento, rugosidad y topografía reales, esto por medio de una prueba en túnel de viento.
  - Se verificó que el comportamiento de la función de la densidad espectral para el caso de  $D/B \geq 3$  tiene un comportamiento peculiar al tener dos crestas, la primera en donde se encuentra la cresta del caso de  $D/B < 3$  pero la segunda en una frecuencia mayor a esta, lo que podría ser causado por una concentración de energía alrededor de esta frecuencia y que esta función esta calibrada para calcular el desprendimiento de vórtices en las edificaciones con esas características.
  - Para el caso en donde  $D/B$  es mayor o igual a 3 al realizar el análisis en el programa MATLAB con el método de bisección se encontraron resultados inconsistentes, posiblemente debido a errores numéricos producidos con el método numérico empleado.
-

- Las aceleraciones calculadas haciendo variar los coeficientes de variación de velocidad y la probabilidad incondicional de percepción demostraron tener una alta dispersión en estas para valores elevados de la  $P_{IP}$ , por lo que fue necesario realizar un ajuste de estos valores para formular la ecuación que permitiera calcular las curvas de los factores de aceleración.
- En los resultados encontrados en el caso del ejemplo de aplicación de la metodología desarrollada se puede comprobar la importancia de esta revisión, ya que si no se realizaría esta al menos el 80% de las personas que ingresaran a este edificio ejemplo percibirían la aceleración causada por el viento en el sentido transversal y que resultaría en una situación de incomodidad para dichas personas; situación no verificable con los métodos que contiene la normativa actual.

## 7.2 TRABAJOS FUTUROS

Es necesario revisar a mayor profundidad los siguientes aspectos, que se encontraron fuera del alcance de esta investigación y que, por lo tanto, es necesario realizar un seguimiento en posteriores investigaciones:

- Analizar el caso en donde  $D/B$  sea mayor o igual a tres, debido a que durante la investigación se observaron muchas inconsistencias numéricas con el método de bisección que provocaban valores muy altos de aceleración para este caso y que además provocaban que los resultados fueran dependientes o sensibles a las variaciones de la velocidad del viento, dimensiones del edificio, etc., por lo que se recomienda la revisión de este caso a través de algún otro método numérico que otorgue resultados más consistentes y fiables, de la misma forma en como ya se tienen en el caso donde  $D/B$  es menor o igual a tres.
  - Se recomienda realizar una revisión más profunda de la función de densidad espectral en el caso de  $D/B \geq 3$  ya que a partir de esta se podría estar ocasionando el error numérico que provoca que la aceleración calculada sea muy alta.
-

## REFERENCIAS

- AIJ (2005). "Recommendations for Loads on Buildings, Chapter 6, Wind Loads". Architectural Institute of Japan.
- Arruñada, Fernando (2015). "Anatomía del aparato vestibular". Revista Faso año 22 – suplemento vestibular 1ª parte, Argentina.
- Bungale S. Taranath Ph., S.E. (2005). "WIND and EARTHQUAKE RESISTANT BUILDINGS". Structural analysis and design, Marcel Dekker, Los Angeles, California, EUA.
- Burton, M.D. (2006), "Effects of low frequency wind-induced building motion on occupant comfort", Ph.D. Dissertation, Departamento de Ingeniería Civil, La Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong, Hong Kong.
- Chapra Steven C. (2007) "MÉTODOS NUMÉRICOS PARA INGENIEROS". Quinta edición, editorial McGraw-Hill Interamericana, México, D F, México.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (2009). "Istruzioni per la valuatazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni". Roma, Italia.
- C. S. Kwok, Kenny et al (2019). "Wind-Induced Motion of Tall Buildings". Editorial ASCE, Reston, Virginia, EUA.
- E. Papalia, Diane (2009). "Psicología del desarrollo", Mc Graw Hill, México, D.F.
- Golding, J. F. (1998). "Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness". Revista Brain Research Bulletin.
- Golding, J. F. (2006). "Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire". Revista Personality and Individual Differences.
- Guyton, Hall (2011). "Tratado de Fisiología Medica". Editorial Elsevier, duodécima edición, Missisipi, EUA.
- MDOC-DV (2020). "Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento". Comisión Federal de Electricidad-Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.
- NBCC (2015). "National Building Code of Canada, part 4 Structural Design, Wind load effects".
- NTC-DV (2017). "Normas Técnicas Complementarias al Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México". Diseño por Viento, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, D F, México.
- Pozos-Estrada, A. (2018) "A simple procedure to evaluate the wind-induced acceleration in tall buildings: an application to Mexico". JCR. Wind and Structures an international journal, Vol. 27(5), pp. 337 – 345, ISSN: 1226-6116.
- Pozos-Estrada, A., Hong, H. and Galsworthy, J. (2010). "Serviceability design factors for wind-sensitive structures". Department of Civil and Engineering, University of Western Ontario, London, ON N6A 5B9, Canada. <https://doi.org/10.1139/L10-013>
-

Simiu, Emil & Yeo, DongHun (2019). "Wind Effects on Structures: Modern Structural Design for Wind". Editor John Wiley & Sons, cuarta edición, EUA.

Standing, S. (2008). "Gray' s anatomy". Cuarta edición, Churchill Livingstone, Reino Unido.

Witkin. (1959). "The perception of upright.". Revista Scientific American.

